



André Filipe Almeida Santos

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

Metodologia de projecto de um semirreboque com estrado extensível

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Doutor João Mário Burguete Botelho Cardoso, Professor
Auxiliar, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Doutor António José Freire Mourão, Professor
Associado, FCT/UNL

Vgais: Doutor Rui Fernando dos Santos Pereira
Martins, Professor Auxiliar, FCT/UNL
Doutor João Mário Burguete Botelho Cardoso,
Professor Auxiliar, FCT/UNL

Novembro, 2020



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

[Metodologia de projecto de um semirreboque com estrado extensível]

Copyright © [André Filipe Almeida Santos], Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Dedicado á minha filha

Agradecimentos

Não seria correcto iniciar este trabalho sem antes agradecer a quem teve um papel preponderante para o tornar possível.

Quero agradecer ao Prof e Orientador João Cardoso pelo apoio incansável e decisivo que me transmitiu. À FCT por me ter formado e, ter criado em mim uma atitude decisora.

Quero agradecer à minha companheira Adriana, pelo apoio inabalável em todas as fases, sem ela não o teria conseguido. Agradeço também aos meus pais o suporte e oportunidade para a realização deste percurso.

Agradeço à Galucho pelos ensinamentos e pelo espaço que me deu para crescer, aprender e errar, em especial ao meu mentor Vitor Feiteira.

Agradeço ainda a todos os amigos, colegas e professores com tive a oportunidade de partilhar esta jornada.

Resumo

Com este trabalho pretende-se, com recurso ao Solidworks e ao Ansys na sua vertente Workbench, definir uma metodologia de projecto de um semirreboque com estrado extensível.

Este tipo de semirreboque apresenta as vantagens de poder circular em condições normais de trânsito, quando recolhido, e de poder transportar peças de grande dimensão, quando estendido, embora nesse caso só possa circular como transporte especial.

O vão do semirreboque estendido está limitado pela flecha máxima resultante do carregamento. Uma forma de a reduzir consiste em aumentar a espessura das chapas aplicadas na construção, o que tem como inconveniente o aumentar do peso da estrutura. Outra forma de reduzir a flecha resultante consiste em projectar o semirreboque de modo que, quando descarregado, apresente uma contra-flecha, isto é uma flecha em sentido contrário à produzida pelo carregamento.

Nesta dissertação explica-se qual é o processo de optimização da espessura das vigas, e do valor da contra-flecha, de forma a obter um veículo que tenha um comprimento máximo superior aos actualmente fabricados no mercado nacional. A metodologia empregue recorre à técnica das superfícies de resposta para estimar a espessura das chapas e o valor da contra-flecha mais adequadas para o comprimento total pretendido.

Espera-se com este trabalho fornecer informação que possa contribuir para melhorar a competitividade da indústria nacional.

Palavras-chave: contra-flecha, superfície de resposta, metodologia, semirreboque, estrado extensível

This work uses Solidworks and Ansys Workbench to define a project methodology for an extensible semi-trailer. This type of semi-trailer has the advantages of being able to move under normal traffic conditions, when retracted, and of being able to transport large parts when extended, although in this case it can only move as a special transport.

The span of the extended semi-trailer is limited by the maximum deformation resulting from loading. One way to reduce it is to increase the thickness of the metal plates used in the construction, which has the inconvenience of increasing the weight of the structure. Another way to reduce the deformation is to project the semi-trailer in such a way that, when unloaded, it presents a camber, that is, a deformation in the opposite direction to that produced by the loading.

This dissertation seeks to explain the optimization processes in the thickness of the beams and the value of the camber in order to obtain a vehicle that has a maximum length greater than those currently manufactured in the national market. The methodology used makes use of the response surface technique to estimate the thickness of the plates and the value of the camber most appropriate for the intended total length.

This work is expected to give information that can contribute to improve the competitiveness of the national industry.

Keywords: camber, response surface, methodology, semi-trailer, extendable bed

Índice

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	DEFINIÇÃO DO SEMIRREBOQUE	7
2.1	MODELO GEOMÉTRICO DO CONJUNTO.....	10
2.2	SUBCONJUNTO I.....	11
2.2.1	<i>King – Pin</i>	12
2.3	SUBCONJUNTO II.....	14
2.4	SUBCONJUNTO III.....	15
2.4.1	<i>Eixos</i>	16
2.4.2	<i>Rodas</i>	16
2.4.3	<i>Boleia giratória</i>	17
3.	MODELO NUMÉRICO.....	19
3.1	CONDIÇÕES FRONTEIRA	19
3.2	CARREGAMENTO	21
3.3	COEFICIENTE DE SEGURANÇA	22
4.	SIMULAÇÃO	23
4.1	IMPORTAÇÃO	24
4.2	RESULTADOS.....	29
4.3	EFEITO AMBIENTAL.....	32
5.	OPTIMIZAÇÃO	35
5.1	CASOS DE ENSAIO	39
5.2	RESPOSTA.....	42
6.	CONCLUSÕES.....	49
	BIBLIOGRAFIA	50
	ANEXO A	53
	ANEXO B.....	54
	ANEXO C.....	55
	ANEXO D	55
	ANEXO E.....	56
	ANEXO F	57

Lista de Figuras

FIGURA 1-1 SEMIRREBOQUE TRANSPORTE SUBESTAÇÕES	1
FIGURA 1-2 SEMIRREBOQUE ESTRADO MADEIRA.....	2
FIGURA 1-3 SEMIRREBOQUE ESTRADO PARA TRANSPORTE DE BOBINES DE AÇO.....	2
FIGURA 1-4 SEMIRREBOQUE EXTENSÍVEL TRANSPORTANDO PERFIS DE BETÃO	4
FIGURA 2-1 SEMIRREBOQUE COM TANQUE	7
FIGURA 2-2 RAIO DE VIRAGEM NO TRAILERWIN.....	9
FIGURA 2-3 CONFIGURADOR DAF.....	10
FIGURA 2-4 ASPECTO COMPLETO DO SEMIRREBOQUE	11
FIGURA 2-5 CONTORNO DO PESCOÇO DE CAVALO	11
FIGURA 2-6 ASPECTO DO CONJUNTO I.....	12
FIGURA 2-7 ASPECTO DO SUBCONJUNTO II	14
FIGURA 2-8 DETALHE DE CONTRA-FLECHA	15
FIGURA 2-9 DETALHE DE CONTRA-FLECHA GERAL.....	15
FIGURA 2-10 ASPECTO DO SUBCONJUNTO III.....	16
FIGURA 2-11 BOLEIA GIRATÓRIA GERAL.....	17
FIGURA 2-12 BOLEIA GIRATÓRIA MONTADA NUM CHASSIS.....	18
FIGURA 3-1 CONDIÇÕES FRONTEIRA 2D	19
FIGURA 3-2 VALIDAÇÃO DO EQUILÍBRIO DE FORÇAS	20
FIGURA 3-3 LOCALIZAÇÃO DAS CARGAS APLICADAS	22
FIGURA 3-4 SEMIRREBOQUE COM CARGA COM CENTRO DE GRAVIDADE ALTO	22
FIGURA 4-1 IMPORTAÇÃO DE MODELO PARA O ANSYS WORKBENCH.....	25
FIGURA 4-2 PROPRIEDADES DO MODELO NO ANSYS	26
FIGURA 4-3 ANSYS TIPOS DE ELEMENTOS	26
FIGURA 4-4 ANSYS MALHA GERAL	27
FIGURA 4-5 ANSYS MALHA DETALHE	27
FIGURA 4-6 ANSYS FORÇAS DO CARREGAMENTO APLICADO.....	28
FIGURA 4-7 ANSYS TENSÕES MODELO DE CONTROLO	29
FIGURA 4-8 ANSYS CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES MODELO DE CONTROLO.....	30
FIGURA 4-9 ANSYS DEFORMAÇÃO EM Y DE MODELO DE CONTROLO	31
FIGURA 4-10 CICLO DE VIDA DO PRODUTO	31
FIGURA 4-11 EVOLUÇÃO DE EMISSÕES DE CARBONO NA UE, PARLAMENTO EUROPEU.....	32
FIGURA 4-12 REPARTIÇÃO DAS EMISSÕES DE DIÓXIDO DE CARBONO, PARLAMENTO EUROPEU	33
FIGURA 5-1 ANSYS SECÇÃO EM VISTA DE CORTE	35
FIGURA 5-2 FLEXÃO DE VIGAS POR "MECHANICS OF MATERIALS".....	36
FIGURA 5-3 SECÇÃO E SEUS ELEMENTOS.....	37
FIGURA 5-4 LISTAGEM DE ENSAIOS EM ANSYS	41
FIGURA 0-1 ANEXO A KING-PIN JOST.....	53
FIGURA 0-2 ANEXO B EIXO BPW	54

FIGURA 0-3 ANEXO C EIXO GIGANT.....	55
FIGURA 0-4 ANEXO D BOLEIA GIRATÓRIA JOST.....	55

Lista de Tabelas

TABELA 1 CARREGAMENTO A APLICAR	21
TABELA 2 PROPRIEDADES DO MATERIAL.....	25
TABELA 3 DISTRIBUIÇÃO DE FORÇAS DO CARREGAMENTO APLICADO	28
TABELA 4 ALTERAÇÃO DE PARÂMETROS.....	39
TABELA 5 LISTAGEM DE ENSAIOS E RESULTADOS	42
TABELA 6 LISTAGEM DE VALORES PARA MÍNIMOS QUADRADOS	44

Lista de gráficos

GRÁFICO 1 RESIDUAL VS RESULTANTE DE DEFORMADA ESTIMADA.....	45
GRÁFICO 2 RESIDUAL VS ESPESSURA DOS BANZOS.....	45
GRÁFICO 3 RESIDUAL VS CONTRA-FLECHA.....	46
GRÁFICO 4 FUNÇÃO SUPERFÍCIE DE RESPOSTA	47
GRÁFICO 5 REPRESENTAÇÃO DA FUNÇÃO DE RELAÇÃO CONTRA-FLECHA VS ESPESSURA	48

Lista de abreviaturas

GCW - Peso máximo rebocado

GVW - Peso máximo autorizado

INE - Instituto Nacional de Estatística

ISO - Organização internacional de standardização

RSM - Metodologia de superfície de resposta

UNECE - Comissão Económica das Nações Unidas para a Europa

1. Introdução

O transporte rodoviário, segundo dados do INE, foi responsável por 90.8% das 243.9 milhões de toneladas de mercadorias transportadas em Portugal em 2019.

O semirreboque é um dos veículos mais regularmente usados para o transporte de carga. Como indicado na fig. 1-1, consiste numa plataforma com rodas que, para circular, necessita de ser acoplado a um tractor através de uma articulação designada *King-pin*.

Existem diversos tipos de semirreboque, consoante o tipo de carga a transportar.



Figura 1-1 Semirreboque transporte subestações

Este estudo reflete-se sobre semirreboques estrado, que são semirreboques com uma plataforma que permite o transporte de carga numa superfície plana. A carga tem de ser amarrada mediante o uso de dispositivos adequados para o efeito.

O mercado de semirreboque estrado é extenso, sendo, portanto, um produto comum na carteira dos fabricantes de semirreboques.

É um produto versátil para o transportador uma vez que grande parte da carga geral é transportada com recurso a este.

Dentro da família do produto existem modelos específicos consoante as necessidades específicas que o transporte obrigue.

Existem modelos que são específicos para o transporte de madeira, como o indicado na fig. 1-2



Figura 1-2 Semirreboque estrado madeira

Outros para o transporte de bobines de aço, como mostrado na fig. 1-3:



Figura 1-3 Semirreboque estrado para transporte de bobines de aço

O modelo mais comum de semirreboque estrado em circulação em Portugal tem o comprimento fixo de 13,6m e 3 eixos. Sendo apto para o transporte normal, mas, não estando preparado para transporte de cargas de grandes volumes. Sendo bastante utilizado para o transporte de contentores ou para um conjunto de cargas de dimensões reduzidas. Usualmente está fabricado para um peso bruto do conjunto trator semirreboque e carga de 41t.

Contudo, com a evolução das diversas áreas de engenharia, a dimensão das cargas a transportar aumentou. Surge então a necessidade de o comprimento do semirreboque acompanhar esse aumento.

Todavia, o comprimento máximo permitido, em condições normais de circulação, não aumentou.

Podem-se encontrar várias justificações, mas, talvez a mais óbvia seja a de que a via rodoviária não está preparada para semirreboques de grandes dimensões.

As dimensões para circulação na via rodoviária são definidas pela Directiva 96/53/CE de 25 de julho de 1996, sendo que para este estudo as informações mais relevantes constantes dessa directiva são:

"semi-reboque", qualquer veículo destinado a ser atrelado a um veículo a motor, de tal maneira que uma parte deste reboque repouse sobre o veículo a motor e uma parte substancial do seu peso e do peso da carga seja suportada pelo referido veículo, e que, pela sua construção e organização interna, se destine ao transporte de mercadorias".

"Conjunto de veículos" (...) veículo articulado constituído por um veículo a motor acoplado a um semi-reboque".

"Comprimento máximo (...) veículo articulado 16,50 m".

"Qualquer veículo a motor ou conjunto de veículos em movimento deve poder girar dentro de uma coroa circular com um raio exterior de 12,50 m e um raio interior de 5,30 m".

"Distância máxima entre o eixo da cavilha de engate e a retaguarda do semirreboque 12,00 m".

De forma a cumprir a directiva e a satisfazer a necessidade de transportar elementos de maiores dimensões surgiram os semirreboques extensíveis, com um comprimento da plataforma de carga que é variável,

A grande vantagem destes semirreboques extensíveis é o facto de poderem circular tanto em condições normais de trânsito, quando a plataforma está recolhida, como em condições de transporte especial, quando a plataforma está estendida. A fig. 1-4 representa um semirreboque extensível com a plataforma estendida para poder transportar perfis pré-fabricados de betão.



Figura 1-4 Semirreboque extensível transportando perfis de betão

O semirreboque extensível tem vindo a ganhar cota de mercado, sendo cada vez mais um produto comum na carteira de fabrico dos fabricantes europeus.

Contudo é um produto que tarda em ganhar peso entre os fabricantes do mercado nacional.

Uma das possíveis justificações é o facto do seu fabrico se tornar complexo com o aumento do vão extensível e com o aumento da carga a transportar.

Existem diversas abordagens que variam com o conhecimento, experiência e capacidade de fabrico de cada fabricante.

Com este trabalho pretende-se desenvolver uma metodologia de projecto de um semirreboque estrado extensível utilizando ferramentas de projecto assistido por computador, análise por elementos finitos e optimização estrutural. O objectivo principal consiste na optimização da estrutura das vigas e do valor da contra-flecha em função do vão extensível desejado.

A contra-flecha consiste na deformação inicial que o semirreboque deve ter com vista a reduzir o valor de deformação, em relação ao estado paralelo ao solo, após carregamento da plataforma.

A existência de uma contra-flecha permite reduzir os casos de flecha excessiva depois de carregado e tem como inovação permitir aumentar o vão extensível em relação ao vão máximo correntemente utilizado, em particular no mercado nacional.

A metodologia utilizará modelos numéricos criados em Solidworks e em Ansys Workbench e também o método das superfícies de resposta. Com o programa Solidworks será desenhada a estrutura para obter um modelo que seja flexível e rápido de alterar com vista a ser modificado no decorrer das várias simulações que serão realizadas no Ansys.

A dissertação está dividida em quatro partes, a saber: Definição do semirreboque; Modelo de ensaio; Simulação numérica; Optimização. Todas estas partes correspondem a capítulos distintos. Existe ainda um capítulo inicial de Introdução e outro final com as Conclusões.

No capítulo Introdução é apresentado o tema da dissertação, os seus objectivos e a forma como está organizada.

A definição das principais características do semirreboque é feita no capítulo seguinte, com a descrição da geometria, dimensões, materiais e componentes. Serão indicados fornecedores dos componentes externos, sendo que o projecto não será fechado apenas aos mesmos, ou seja, será possível recorrer a fornecedores diferentes, caso desejado.

De seguida, no capítulo sobre Modelação Numérica, será definido um modelo para ensaio que melhor traduz a realidade. Serão definidas as condições fronteira e serão calculadas as cargas a aplicar em função da distribuição de cargas previstas. Garantindo que as cargas permitem aplicar o valor máximo expectável sobre os eixos e sobre o *King-pin*.

No capítulo Simulação será feita a importação do modelo para o Ansys Workbench, serão representadas as condições fronteira e será aplicado o carregamento nas diferentes faces. Será gerada a malha e verificada a ausência de problemas de importação. Por fim, realizar-se-ão os ensaios necessários até que a estrutura seja considerada uma boa base de optimização.

Em Optimização, com base nos capítulos anteriores, serão realizados vários ensaios variando parâmetros para construir a superfície de resposta que permitirá escolher os valores óptimos dos mesmos, o que por sua vez permitirá cumprir os objectivos deste trabalho.

No capítulo final serão apresentadas as principais conclusões.

2. Definição do semirreboque

O chassis será projectado para um semirreboque de 4 eixos, de 12t de capacidade por eixo. Esta decisão tem por base obter não só um produto com um comprimento elevado, mas também uma capacidade de carga bastante alta.

O transporte especial é tão imprevisível quanto a espetacularidade das cargas que é necessário transportar hoje em dia.

Projectar um semirreboque de comprimento maior que o habitual e com 4 eixos faz com que tenha de ser capaz de transportar um valor de carga bastante superior ao que é habitual em transporte dito normal. Na fig. 2-1 está representado um semirreboque extensível estendido que transporta um tanque.

A condição de elevado comprimento faz com que o desafio de projecto seja superior pois o aumento de resistência não pode ser exagerado, de tal forma que se traduza num aumento significativo de peso, mas não pode ser reduzido de modo a que a estrutura não suporte as cargas aplicadas.



Figura 2-1 Semirreboque com tanque

O projecto do chassis iniciou-se com a leitura da legislação e normas vigentes.

Com este conhecimento foi definido que o semirreboque terá 13,6 m de comprimento fechado, valor que permite transportar contentores de 45" e, mediante trator 4x2 circular sem licença especial de trânsito.

Optou-se por chassis com vigas de secção quadrada, em detrimento de vigas de secção I. Esta escolha, baseia-se no aumento de resistência à flexão e torção associadas à secção quadrada em detrimento da secção em I.

O chassis do semirreboque deste estudo é uma estrutura de comprimento variável. Tendo um total de 7250 mm de variação de comprimento. Este estudo começa com o caso mais desfavorável, a que corresponde o comprimento máximo. Para uma extensão de 7250 mm corresponde o comprimento total de 20850 mm, caso em que se verifica uma maior solicitação da estrutura.

Um semirreboque desta envergadura não seria manobrável, nem cumpriria as normas / directivas, se não tivesse algum tipo de controlo forçado de viragem dos eixos.

Aqui, optou-se por aliar eixos fixos a boleias giratórias. Com esta solução o conjunto trator e semirreboque pode circular em caminhos e descrever curvas que de outra forma seriam impossíveis de realizar. A fig. 2-2 foi recolhida do programa TrailerWin e nela é possível verificar as duas circunferências , mínima e máxima previstas na directiva 96/53/CE de 25 de julho de 1996. Entre as quais um semirreboque em circulação normal deve obrigatoriamente estar compreendido durante uma curva de 180°.

Em transporte especial esta obrigatoriedade não existe, todavia obriga o transportador a preparar a rota e conhecer os obstáculos que terão de ser transpostos no caminho.

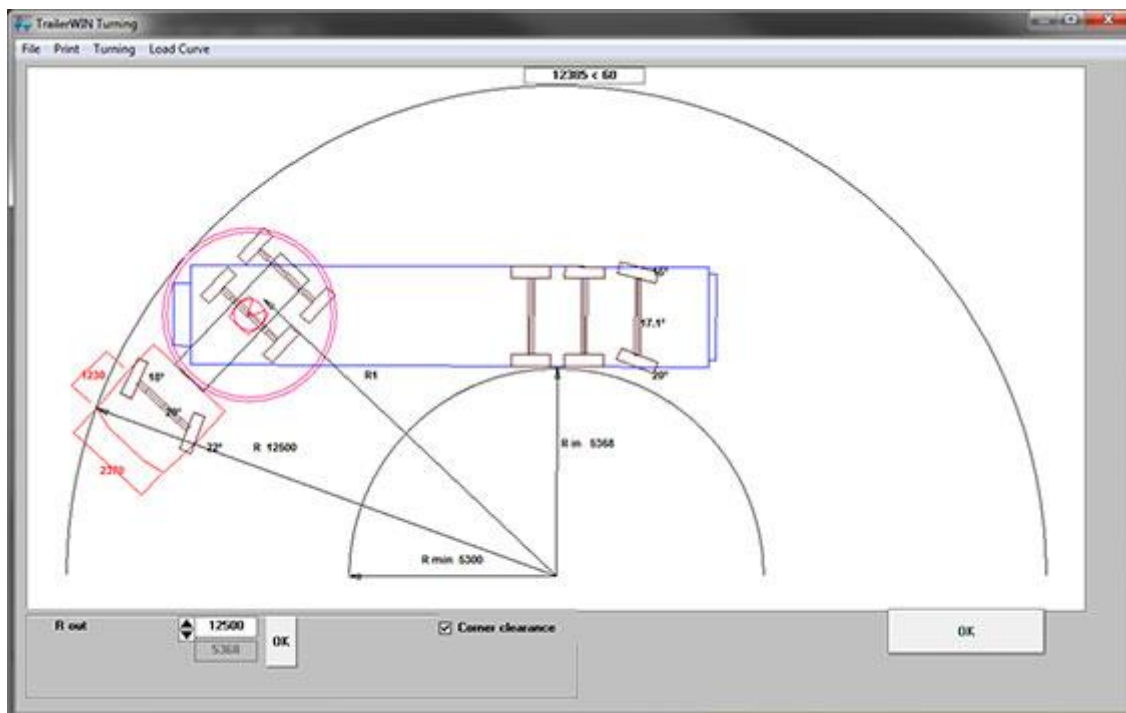


Figura 2-2 Raio de viragem no TrailerWin

Iniciou-se a definição das espessuras e alturas a utilizar com base na experiência e no conhecimento adquirido com projectos de semirreboque realizados anteriormente.

O semirreboque tem a característica de poder ser utilizado por diversos tipos de tratores, possibilitando ao transportador utilizar os tratores da sua frota. Apenas em transporte especial, e/ou, quando se pretender otimizar todas as capacidades do semirreboque será, como é normal, necessário utilizar um trator que tenha uma capacidade correspondente ao peso bruto do semirreboque.

Considera-se que semirreboque terá um peso bruto de 77t. 48t nos eixos e 29t no *King-pin*.

Pretende-se que o semirreboque tenha uma altura de acoplamento ao trator de 1300 mm, este valor foi escolhido por ser um valor comum para tratores com a capacidade que o semirreboque deste estudo tem. Grande parte dos tratores 4x2 também possibilitam o acoplamento a esta altura. Na fig. 2-3 está representada uma possibilidade de trator a utilizar. Neste caso apenas os dois últimos modelos poderiam ser

utilizados em transporte especial, pois, são os únicos que permitem uma carga de 29t no engate e um peso bruto de 77t.








DAF Truck Configurator			
Model name	Top view	GVW max	GCW max
XF 450 FT		20500	60000
XF 450 FT Low Deck		19500	50000
XF 450 FTG		28000	60000
XF 450 FTP		24900	50000
XF 450 FTS		28000	60000
XF 430 FTT		33000	78000
XF 430 FTM		41000	78000

Figura 2-3 Configurator DAF

O somatório da altura de acoplamento com a altura da viga na zona do *king-pin* é igual ao somatório da altura de trabalho do eixo com a altura da boleia e da viga na zona dos eixos. Assim fica garantido que a plataforma do estrado está ao mesmo nível.

Neste estudo considera-se como altura de viga na zona frontal o valor de 230mm.

Com o intuito de detalhar a descrição do semirreboque, o chassi será dividido em três subconjuntos, a saber, I, II e III.

2.1 Modelo Geométrico do Conjunto

Antes de detalhar individualmente cada um dos três subconjuntos e respectivos componentes fica-se com o modelo geométrico desenhado em Solidworks que se representa na fig. 2-4.

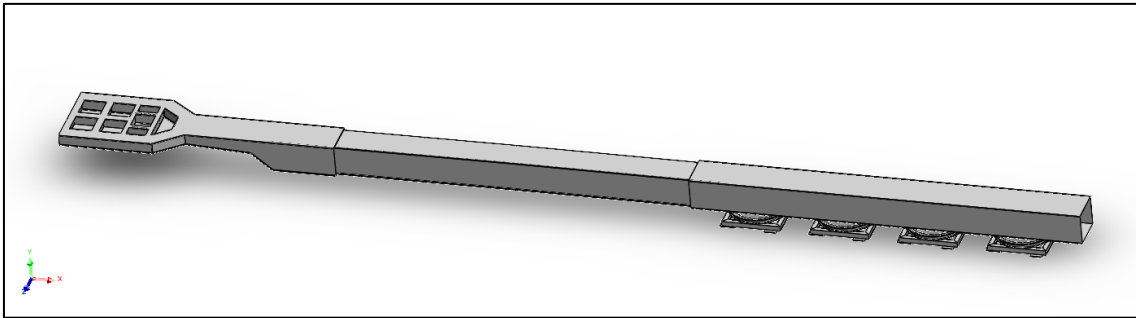


Figura 2-4 Aspecto completo do semirreboque

O ponto de origem do referencial é na base do *King-Pin*

O desenho técnico, com detalhes dimensionais gerais e individuais de cada subconjunto pode ser consultado no Anexo E.

2.2 Subconjunto I

O subconjunto I é composto por uma estrutura de secção variável. É nesta estrutura que é feito o acoplamento ao tractor através da ligação *King-Pin* – 5ª roda. De forma a garantir a compatibilidade de engate, é fundamental cumprir a norma ISO 1726.

A norma ISO 1726 regula o dimensionamento da zona de acoplamento. Impondo no dimensionamento do pescoço de cavalo o contorno a respeitar indicado a fig. 2-5.

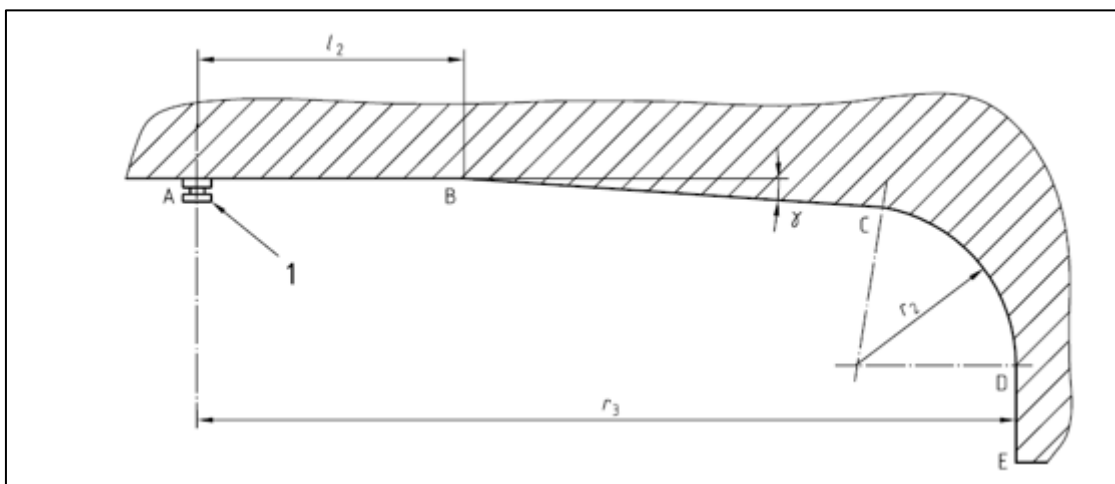


Figura 2-5 Contorno do pescoço de cavalo

Onde:

$$l_2 = 750 \text{ mm}$$

$$\gamma = 4^\circ$$

$$r_2 = 450 \text{ mm}$$

$$r_3 = 2300 \text{ mm}$$

$$1 = \text{King - Pin}$$

O subconjunto I tem o aspecto indicado na fig. 2-6

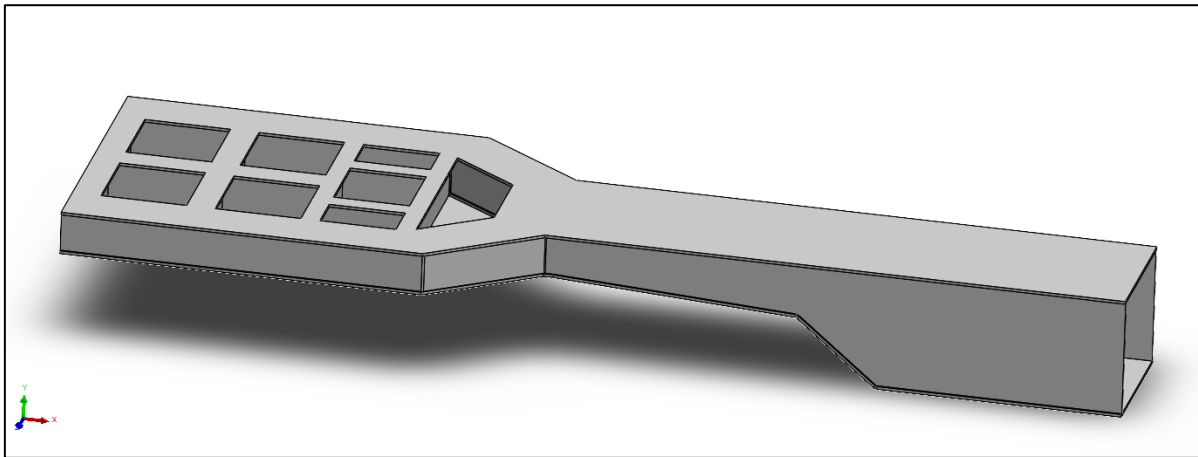


Figura 2-6 Aspecto do conjunto I

A zona do King-Pin não é fechada para permitir a passagem de cablagem e circuitos pneumáticos, possui o aspecto quadriculado de modo a reforçar a zona e ao mesmo tempo permitir espaço de trabalho para as referidas ligações.

2.2.1 King – Pin

Existem no mercado *King-Pins* de 2'' e de 3 ½'', pelo que, é importante especificar qual deles é utilizado no semirreboque

O processo de escolha do *King-Pin* tem início no cálculo do *D-Value*, devendo ser cumprido o regulamento N°55 da UNECE.

O regulamento, entre outros, especifica que:

“O valor D ou D_c , é definido como o valor teórico de referência das forças horizontais aplicadas ao veículo tractor e ao reboque e é utilizado como base para as cargas horizontais nos ensaios dinâmicos (...)

No caso de pratos de engate (...) o valor é:

$$D = g \cdot \frac{0.6 \times T \times R}{T \times R - U} [KN] \quad (2.1)$$

Sendo que:

T é a massa máxima tecnicamente admissível do veículo tractor em toneladas. Se relevante, tal inclui a carga vertical transmitida por um reboque de eixo central

R é a massa máxima tecnicamente admissível, em toneladas, do reboque completo com lança de tracção móvel no plano vertical, ou do semirreboque.⁽¹⁾

g é a aceleração da gravidade (considerar igual a 9.81 m/s^2)

(...)

O valor U é a massa vertical, em toneladas, transmitida ao prato de engate por um semirreboque com a massa máxima tecnicamente admissível.⁽¹⁾

(1) A massa T e R e a massa tecnicamente admissível podem ser superiores à massa máxima admissível prescrita pela legislação nacional em causa. ”

Para este estudo podem ser considerados os seguintes valores:

$$T = 41 [t]$$

$$R = 29 + (12 \times 4) = 77 [t]$$

$$U = 29 [t]$$

Obtém-se,

$$D = 208.79 [KN]$$

Através do catálogo da Jost é seleccionado o *King-Pin* de $3 \frac{1}{2}''$ de modelo KZ 1016 (Anexo A).

2.3 Subconjunto II

O subconjunto II é composto por uma viga de secção uniforme e eixo da viga curvo. A secção transversal será ilustrada no Capítulo 5.

O conjunto II é unido através de ligação soldada ao conjunto I, sendo deslizante sobre o conjunto III.

É esta ligação deslizante que permite variar o comprimento total do semirreboque. Com o comprimento máximo é possível colocar inteiramente sobre a plataforma do semirreboque elementos até 20850 mm de comprimento.

Para alterar o comprimento total do semirreboque, este deve estar travado e totalmente paralelo ao chão. Ficando o trator acoplado encarregue de aplicar a força necessária para vencer o atrito entre vigas, originado escorregamento entre elas.

O sistema de tranque do comprimento está fora do âmbito deste estudo, mas, será utilizado um sistema de encavilhamento do subconjunto II relativamente ao subconjunto III conectado a uma camara de travagem de accionamento pneumático.

Neste estudo é considerado que os conjuntos II e III estão em contacto na superfície superior e inferior exterior do subconjunto II e interior do conjunto III.

O subconjunto II está representado na fig. 2-7

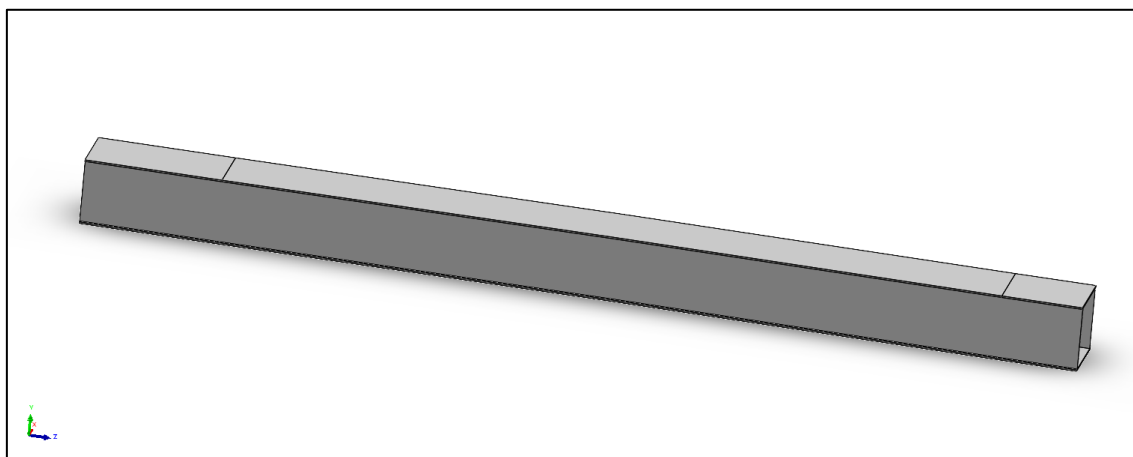


Figura 2-7 Aspecto do subconjunto II

É no subconjunto II que a contra-flecha é aplicada, a contra-flecha consiste no valor de deformação da viga entre o estado plano e o estado deformado.

Exageradamente é ilustrado na fig. 2-8.

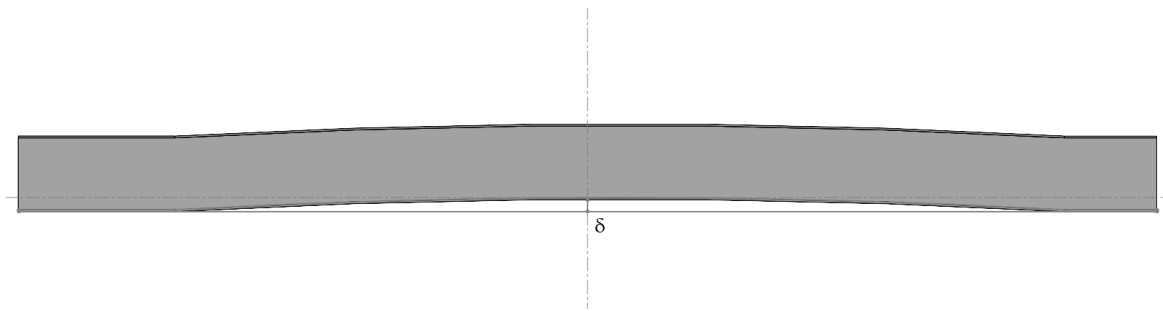


Figura 2-8 Detalhe de contra-flecha

Em termos globais pode ser visto na fig. 2-9.



Figura 2-9 Detalhe de contra-flecha geral

2.4 Subconjunto III

O subconjunto III consiste numa estrutura que permite incorporar as rodas, fazendo assim a ligação ao solo.

Esta estrutura engloba uma viga de secção uniforme e eixo da viga rectilíneo, boleia giratória e eixos.

Os eixos estão 1810 mm espaçados entre si, este valor foi escolhido para possibilitar tanto uma área de transferência de esforço ao solo elevada como um raio de curvatura do eixo significativo. Este valor permite que a carga por eixo, legal, possa ser de 12t por eixo.

A dimensão da área de transferência de esforço é importante pois existem regulamentações e restrições que podem limitar, ou mesmo impedir a circulação do semirreboque uma vez que irá provocar no pavimento um esforço superior ao que este foi concebido para suportar.

A ligação entre a viga e cada eixo é feita com recurso a boleias giratórias.

O subconjunto III tem o aspecto que está representado na fig. 2-10

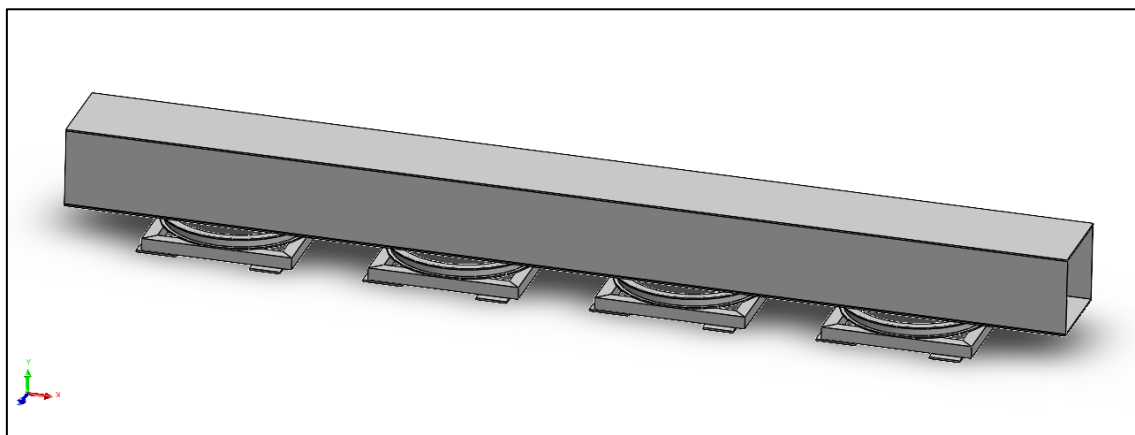


Figura 2-10 Aspecto do subconjunto III

2.4.1 Eixos

Optou-se por utilizar eixos de 12t de capacidade a 105 km/h que permitam montagem em modo rodado duplo de rodas de 17.5".

Pretende-se uma altura de trabalho do eixo de aproximadamente 250 mm e com uma via de 1950 mm, já que a largura total do semirreboque não poderá exceder os 2550 mm.

O chassis está preparado para poder ser equipado com eixos de várias marcas diferentes, desde que a altura de trabalho e a via sejam respeitadas, e, assim sendo, caberá ao cliente escolher qual prefere que equipe o seu semirreboque.

A título de exemplo representam-se as opções de eixos da marca BPW (Anexo B) e Gigant (Anexo C).

2.4.2 Rodas

As rodas devem ser escolhidas, em função da geometria e capacidade do eixo, do tipo de veículo que vão equipar e do tipo de percursos nos quais o semirreboque vai operar.

Assim, optou-se por escolher rodas de dimensão 245/70R17.5 que permitem uma carga por linha de eixo para rodado duplo de 12t, não se tendo sido especificado o tipo de rasto do pneu.

2.4.3 Boleia giratória

A boleia giratória faz a ligação entre a viga e a estrutura à qual o eixo está solidário. Permitindo que haja rotação entre o eixo e a viga, transferindo tanto a força normal como a tensão de corte que ocorrer durante a circulação. Na fig. 2-11 encontra-se o aspecto geral de uma boleia giratória enquanto que a fig. 2-12 ilustra a boleia aplicada num chassis conforme este estudo.

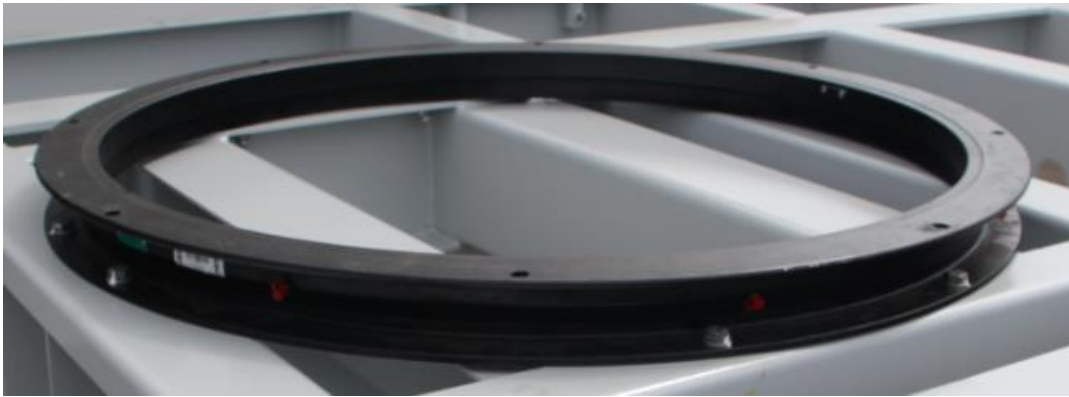


Figura 2-11 Boleia giratória geral



Figura 2-12 Boleia giratória montada num chassis

Foi selecionada uma boleia de capacidade 13t, tendo assim a mesma capacidade do que o eixo e as rodas a que está interligada, quando o semirreboque circula a velocidade reduzida. Isto é, em velocidade reduzida, tipicamente inferior a 30 Km/h os fabricantes dos eixos e dos pneus permitem um aumento de carga. O modelo escolhido é o KKK HE 1300 - 22 (Anexo D), de manutenção standard o que a torna num modelo comum e simples de obter em caso de necessidade de substituição. Tendo ainda a vantagem de ser um modelo de baixa e fácil manutenção.

3. Modelo Numérico

3.1 Condições fronteira

Uma vez definidas as condições reais expectáveis de trabalho, é possível elaborar um modelo de simulação que, com algumas simplificações, traduza a realidade.

Considera-se que o semirreboque transportará elementos que serão apoiados igualmente ao longo da estrutura. A carga aplicada por esses elementos será igual ao somatório da distribuição de cargas aplicadas no *king-pin* e nos eixos, de forma a que o peso bruto total do semirreboque seja atingido.

São feitas as seguintes considerações, representadas na fig. 3-1



Figura 3-1 Condições fronteira 2D

A – A ligação trator-semirreboque, realizada entre a quinta-roda e o *King-pin*, será considerada como uma ligação em que o *King-Pin* está constrangido nas três direcções, sendo permitido rotação livre em torno dos 3 eixos.

B – A ligação ao solo é simulada através da aplicação de duas forças por eixo, uma de cada lado, equivalentes à resultante das forças que são aplicadas no eixo pelas rodas. Cada força aplicada vale 58860 N.

Cada uma das 8 forças é aplicada num elemento que traduz a base de assentamento do mancal.

C – De forma a garantir que estamos perante um sistema possível e determinado, consideramos um ponto na traseira, que está solidário com o eixo Y e Z. Nesse ponto, que se designa PT na fig. 3-2, a carga vertical (eixo y) é aproximadamente 0.

A validação do equilíbrio de forças e momentos é feita pela verificação de que a força resultante do carregamento e da aplicação das condições fronteira origina uma reacção em y no ponto PT aproximadamente nula.

Seguindo o modelo da fig. 3-2:

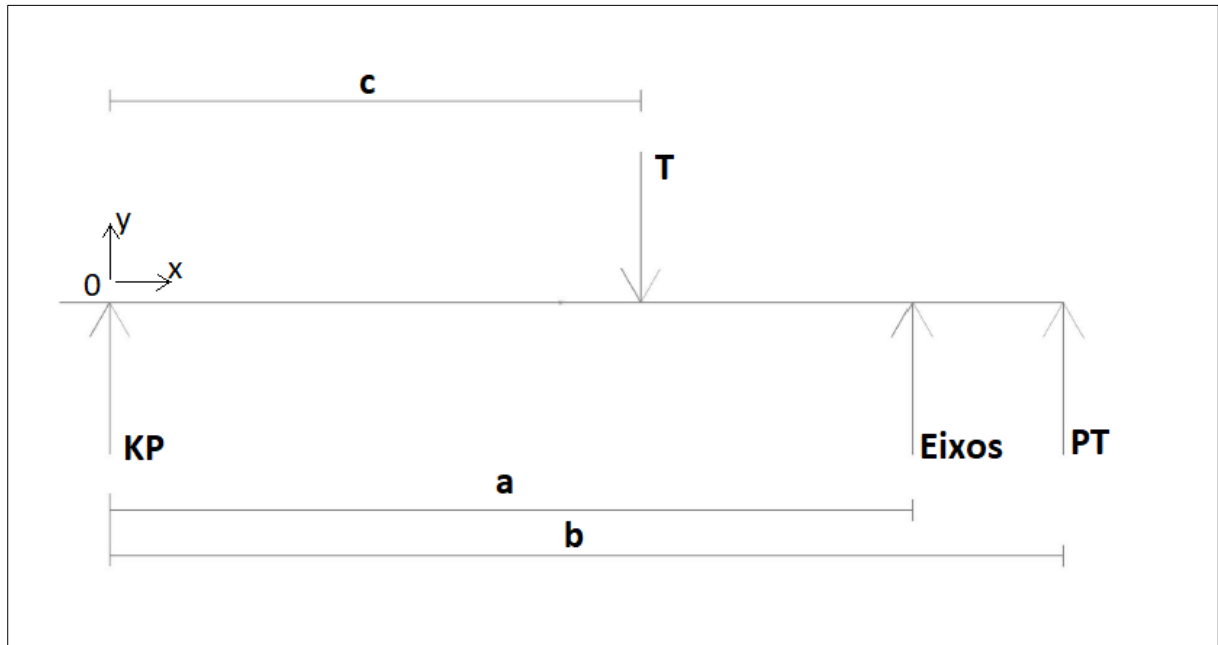


Figura 3-2 Validação do equilíbrio de forças

Considerando:

$$a = 15250 \text{ mm}$$

$$b = 19250 \text{ mm}$$

$$c = 9540 \text{ mm}$$

$$KP = 29000 \text{ Kg}$$

$$Eixos = 48000 \text{ Kg}$$

$$T = 77000 \text{ Kg}$$

O equilíbrio de momentos em relação ao *King-Pin* é dado por:

$$\sum M_{(KP)} = 0 \quad (3.1)$$

De onde:

$$a \times Eixos + b \times PT = c \times T \quad (3.2)$$

Substituindo pelos respectivos valores e calculando em ordem a PT, obtém-se:

$$PT \approx 0 \text{ KN}$$

Assim, é considerado que na traseira do semirreboque a força resultante é nula.

3.2 Carregamento

O semirreboque em estudo tem como objectivo o transporte de elementos de grandes dimensões. Tendo em conta o peso bruto de 77t e a respectiva distribuição de 48t nos eixos e de 29t no *king-pin*, chega-se, como uma das várias hipóteses de carregamento à aplicação de cargas ao longo do semirreboque segundo a tabela 1.

Podem, numa fase posterior a este estudo serem calculadas novas tabelas de carregamento que cumpram o valor resultante de carga nos eixos e no King-Pin do âmbito deste estudo.

Tabela 1 Carregamento a aplicar

Designação	CG [mm]	Distribuição		Total [Kg]
		Eixos [Kg]	King Pin [Kg]	
Estrutura	9540	6754	4042	10797
A	1121	363	4576	4940
B	1121	363	4576	4940
C	860	276	4623	4900
D	2330	817	4532	5350
E	3800	1371	4130	5500
F	11450	7620	2529	10150
G	13350	8885	1264	10150
H	15250	10150	0	10150
I	17150	11415	-1265	10150
Total	9506	48015	29011	77027

As cargas indicadas por A, B, ... I na tabela 1 são aplicadas num elemento com 758x400 [mm] e estão localizadas na posição indicada na fig. 3-3:

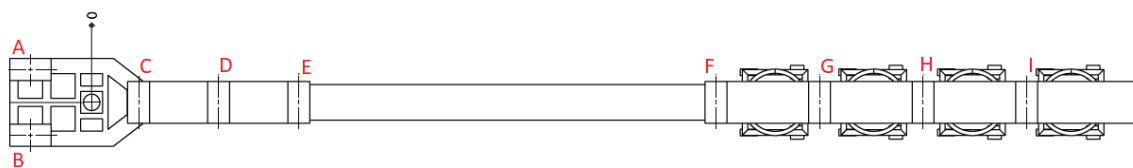


Figura 3-3 Localização das cargas aplicadas

3.3 Coeficiente de segurança

A definição do coeficiente de segurança é muito importante para que exista uma margem de segurança que absorva não só, casos de carga não estudados, como sobrecarga por parte do operador.

Assim para o efeito deste estudo define-se um coeficiente de segurança de 2.5, sendo que este valor foi obtido com base na experiência em projecto, simulação e acompanhamento do produto em casos anteriores. É um valor que pode parecer alto, mas que é sólido pois contempla casos críticos como, circulação em passagens de nível, entradas e saídas de navios, travagens bruscas em curva em que são transportadas cargas com centro de gravidade alto, etc., conforme exemplo da fig. 3-4.



Figura 3-4 Semirreboque com carga com centro de gravidade alto

4. Simulação

A simulação por elementos finitos permite simplificar o processo de validação do produto. Sendo possível reduzir o tempo de ensaio já que, podem ser feitas análises nas várias fases iniciais de projecto e em subconjuntos ou componentes específicos, não sendo necessário o fabrico de um protótipo físico, o que, para aplicação das condições de trabalho teria de ser testado na fase de ensaios ou seria necessário desenvolver e fabricar um dispositivo capaz de simular as condições de trabalho, de modo a ensaiar o componente e serem obtidos resultados.

Este tipo de validação passo a passo permite ir aprovando componentes de menor dimensão, facilitando a evolução do produto e permite ainda a divisão de trabalho por diversas equipas. Não tendo o projecto inteiro de ser analisado como um só.

Por outro lado, permite reduzir a possibilidade de surgimento de resultados impactantes durante a fase de ensaio físico do protótipo.

O ciclo de desenvolvimento do produto, isto é, tempo de projecto, construção de modelo numérico, simulação e entrada em produção é reduzido em relação à metodologia de fabricação de protótipo e ensaio físico.

O que permite aos fabricantes tanto reduzir custos inerentes á criação e desenvolvimento do produto, como, lançar o produto mais rapidamente no mercado, reduzindo assim o tempo de retorno do investimento inicial. Algo fundamental nos dias de hoje, pois nestes tempos a capacidade de inovação tem de estar equiparada à capacidade de adaptação e de agilidade de produção. Já lá vão os tempos em que os clientes escolhiam cegamente uma marca em específico. O preço, o prazo, mas também cada vez mais, a inovação, a clareza e detalhe de informação técnica do produto são factores decisores para a compra de um equipamento deste género.

4.1 Importação

O modelo foi projectado no Solidworks, foi desenhado peça a peça como se fosse feito para produção ao invés de ser projectado como peça única. Os únicos pontos que diferenciam o modelo criado de um modelo para produção dizem respeito às folgas para produção e à adaptação do formato das peças em função das capacidades de fabrico da produção. Algo que para o efeito deste estudo não foi um factor limitador.

A vantagem em simulação do método peça a peça reside em ser possível realizar alterações específicas e localizadas de forma eficaz no modelo geométrico nativo, uma vez que permite a alteração localizada, todavia tem como inconveniente ter de ser realizado um passo intermédio para realizar a simulação de forma expedita. Esse passo consiste na passagem do modelo para peça única de modo a garantir o contacto perfeito entre as várias superfícies quando o modelo é importado em Ansys. Importando apenas uma peça o Ansys não tem de lidar com os contactos entre os vários sólidos e respectivas superfícies. Uma vez que o modelo teria um número considerável de elementos sem o passo intermédio.

Foram construídos vários modelos geométricos, para além dos vários modelos e evoluções realizados na definição do semirreboque, e realizados vários testes de importação até se chegar a esta solução.

Foi testada a importação sem o passo intermédio, sendo a conversão em peça única descartada, contudo verificou-se não ser uma solução viável, pois, o contacto entre as superfícies tornava a análise demasiado morosa e permeável a erro humano. Uma vez que cada ligação entre peças tinha de ser verificada e se necessário definida manualmente.

A solução adoptada foi a única que garantiu o contacto entre os diferentes componentes e que permitiu uma malha de elementos finitos de qualidade alta, o processo de alteração, conversão e importação para cada modelo tem uma duração aceitável.

Iniciou-se o estudo com uma contra-flecha de 10 mm e uma espessura de banzos de 15 mm , estes valores foram escolhidos por se acreditar que seriam os valores espectáveis de alcançar na optimização.

O material foi definido no Solidworks, todavia fruto da conversão em peça única antes da importação as propriedades perdem-se, assim, o material é novamente definido no Ansys após a importação.

Escolheu-se para este estudo o material Strenx 1100 MC do fornecedor SSAB. A escolha deste fornecedor tem por base a escolha de elementos de qualidade alta e comprovada. As propriedades do material estão representadas na tabela 2

Tabela 2 Propriedades do material

Característica (STRENX 1100MC)	Valor
Modulo de Young	210 GPa
Tensão de cedência	1100 MPa
Tensão de ruptura	1450 MPa
Densidade	$7.85 \times 10^{-6} \text{ Kg/mm}^3$

O modelo importado está representado na fig. 4-1, na fig. 4-2 estão ilustradas as propriedades dimensionais do modelo em detalhe. O peso do semirreboque é de 10797 Kg e o seu centro de massa dista 9540 mm da origem do referencial. A origem do referencial está localizada no *King-pin*.

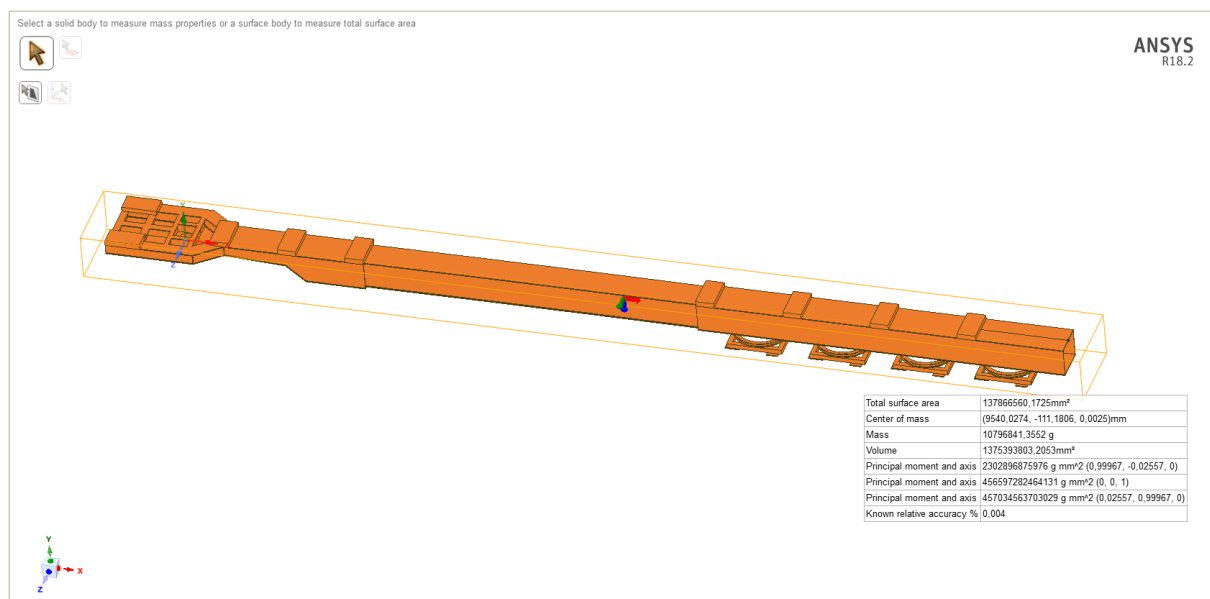


Figura 4-1 Importação de modelo para o Ansys Workbench

Total surface area	137866560,1725mm ²
Center of mass	(9540,0274, -111,1806, 0,0025)mm
Mass	10796841,3552 g
Volume	1375393803,2053mm ³

Figura 4-2 Propriedades do modelo no Ansys

É gerada a malha e comprovada a qualidade da mesma bem como a correcta ligação entre os elementos.

A malha tem 3469963 nós e 1847136 elementos de volume (3D), optou-se por elementos de dimensão de aresta de 15 mm uma vez que após várias gerações de malha variando este parâmetro este foi o valor que originou uma malha com um índice de qualidade de elementos elevado, mas sem um tempo de processamento exagerado. A malha é composta por elementos lineares e elementos quadráticos, estando a sua escolha entre um ou outra feita de forma automática pelo Ansys na sua vertente Workbench, na fig. 4-3 estão presentes os tipos de elementos utilizados pelo Ansys.











Dimension	Degree	Element Shape	Element Type
1D (Line)	Linear		Beam, Truss
	Quadratic		Beam
	Cubic		Beam
2D (Area)	Linear		Plane stress Plane strain Plate, Shell
	Quadratic		
	Cubic		
3D (Volume)	Linear		
	Quadratic		

Figura 4-3 Ansys tipos de elementos

O índice de qualidade da malha é calculado automaticamente pelo Ansys e varia entre 0 e 1, o valor médio aqui presente situa-se em 0,75.

O aspecto geral da malha está documentado de forma geral na fig. 4-4 e em detalhe na fig. 4-5. Em ambas as figuras, está ilustrada a qualidade e o detalhe da malha.

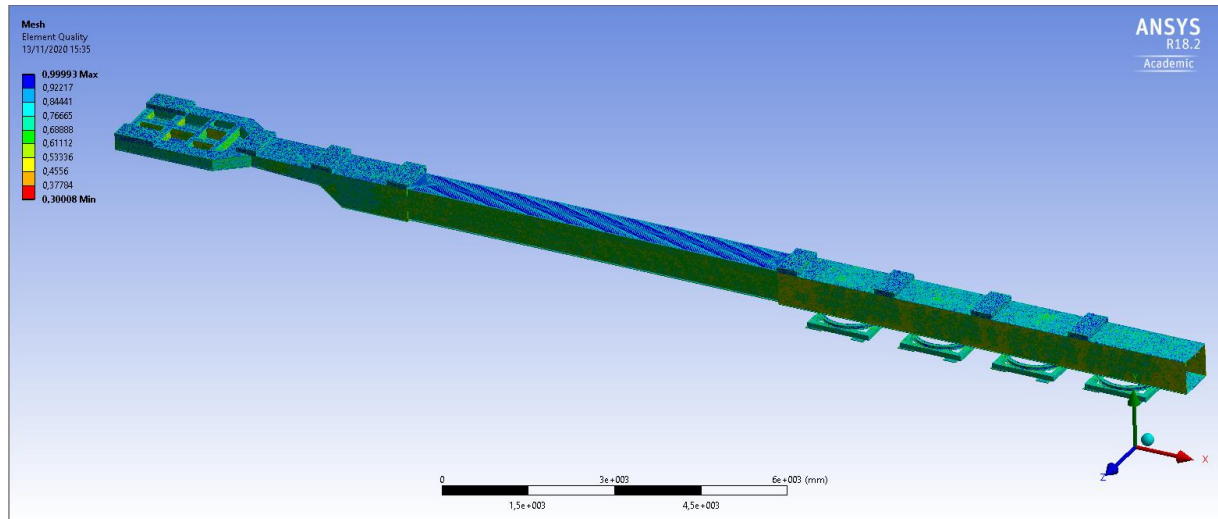


Figura 4-4 Ansys malha geral

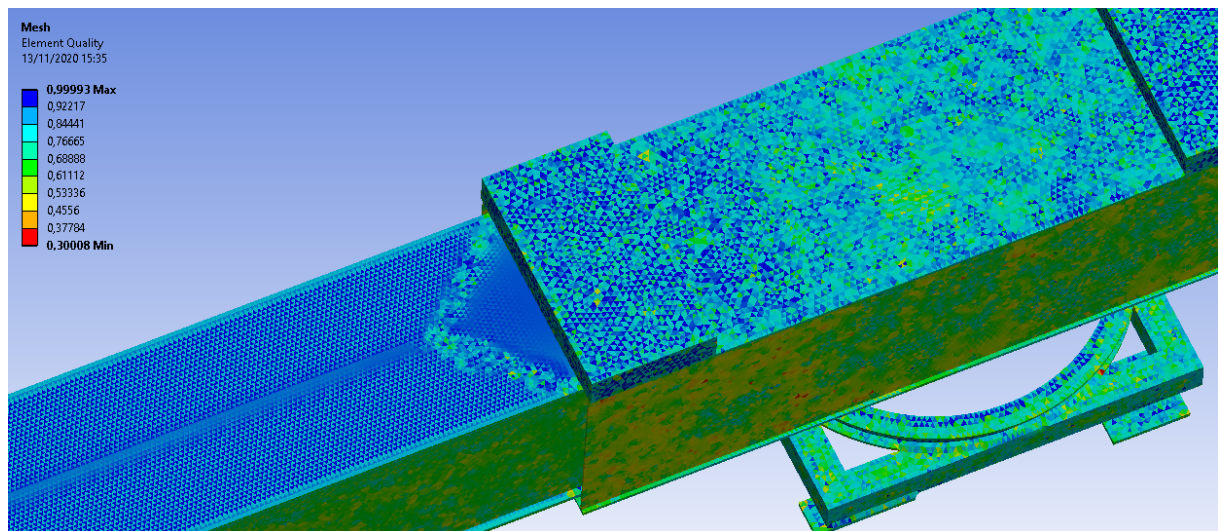


Figura 4-5 Ansys malha detalhe

São aplicados os carregamentos no modelo conforme ilustrado na fig. 4-6 de acordo com os valores presentes na tabela 3. Na fig. 4-6 estão também presentes as condições fronteira do modelo.

Tabela 3 Distribuição de forças do carregamento aplicado

Elemento	Força [N]
A	48461
B	48461
C	48069
D	52484
E	53955
F	99572
G	99572
H	99572
I	99572

É considerado que o semirreboque está sujeito à acção da força da gravidade segundo o eixo y , tendo sido incluída no ensaio ($g = -9.81 \text{ m/s}^2$).

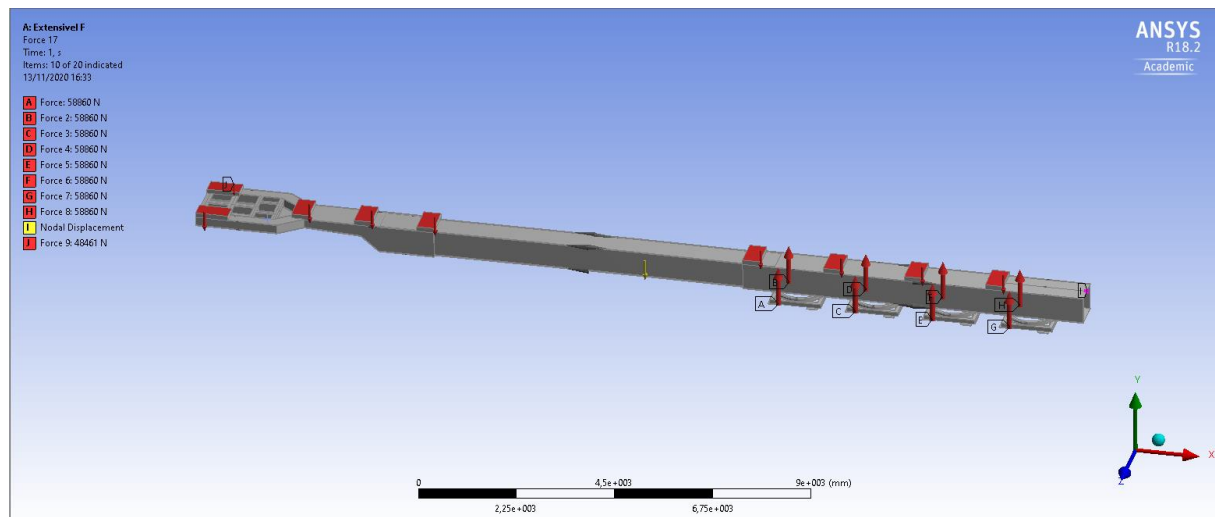


Figura 4-6 Ansys forças do carregamento aplicado

4.2 Resultados

O valor de tensões obtido é considerado adequado, pois situa-se abaixo do valor de cedência do material. O subconjunto II tem valores de tensão inferiores a 50 MPa, o que aplicando o coeficiente de segurança permite não ultrapassar o domínio elástico do material. Nos casos mais solicitados as tensões rondam no máximo os 400 MPa, valor que não representa o limite de elasticidade do material. O aspecto geral da estrutura está representado na fig. 4-7.

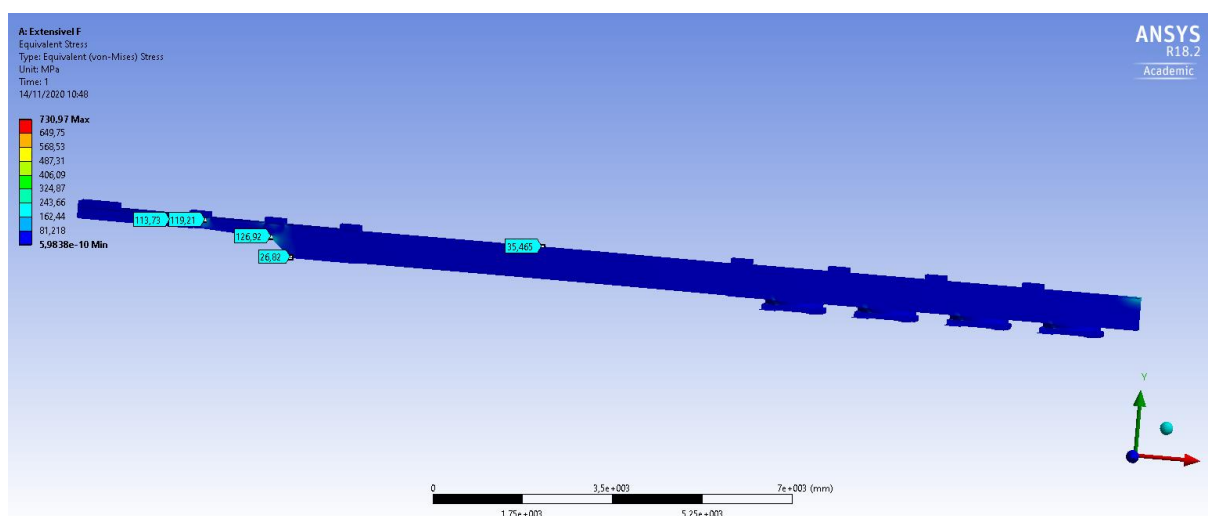


Figura 4-7 Ansys tensões modelo de controlo

Estão presentes no modelo algumas concentrações de tensões, nomeadamente na zona do *king-pin*, conforme pode ser constatado na fig. 4-8.

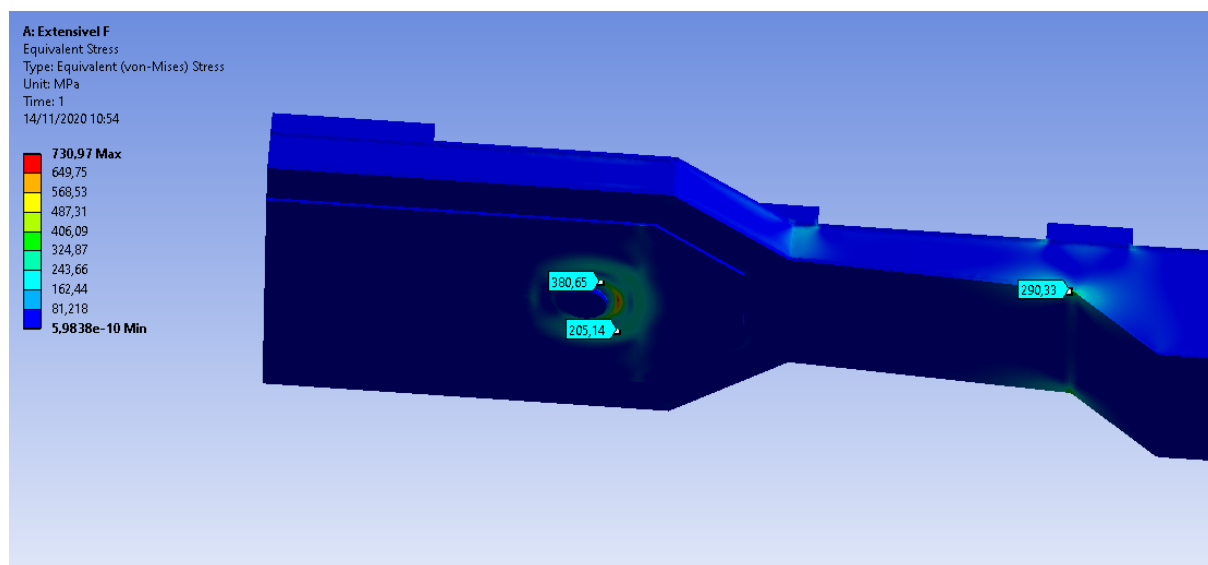


Figura 4-8 Ansys concentração de tensões modelo de controlo

Para este estudo essa zona é considerada desprezável, pois é uma zona que obedece a homologação específica e, portanto, será validada pelas entidades competentes. Sendo ensaiada em detalhe e validada antes de ser considerada em qualquer projecto.

Sendo esta uma zona que seria estudada numa segunda fase, com tratamento próprio para optimização com vista à redução de peso.

Nessa fase já seriam incluídos os restantes elementos que constituem esta zona, a saber, ligações ao tractor, passagem de cablagem, inclusão de sistemas de controlo e de auxílio à condução.

Com base nos resultados obtidos considera-se que a escolha do aço está validada, aliás numa primeira abordagem pode inclusive considerar-se que o modelo se encontra sobredimensionado ou que, de outra forma, a matéria prima escolhida não necessita de ser de tão alto limite elástico. Para os efeitos deste estudo mantém-se a escolha do material Strenx 1100 MC

Obteve-se um valor de deslocamento máximo segundo o eixo y de $-18,7\text{ mm}$, conforme fig. 4-9, o que significa que após o carregamento a viga terá a sua concavidade oposta à concavidade inicial. A este deslocamento deverá ser subtraída a contraflecha de 10 mm para obter o deslocamento máximo segundo y , medido a partir da linha recta que representa o eixo da viga. o que para este caso é de $8,7\text{ mm}$ com sentido negativo.

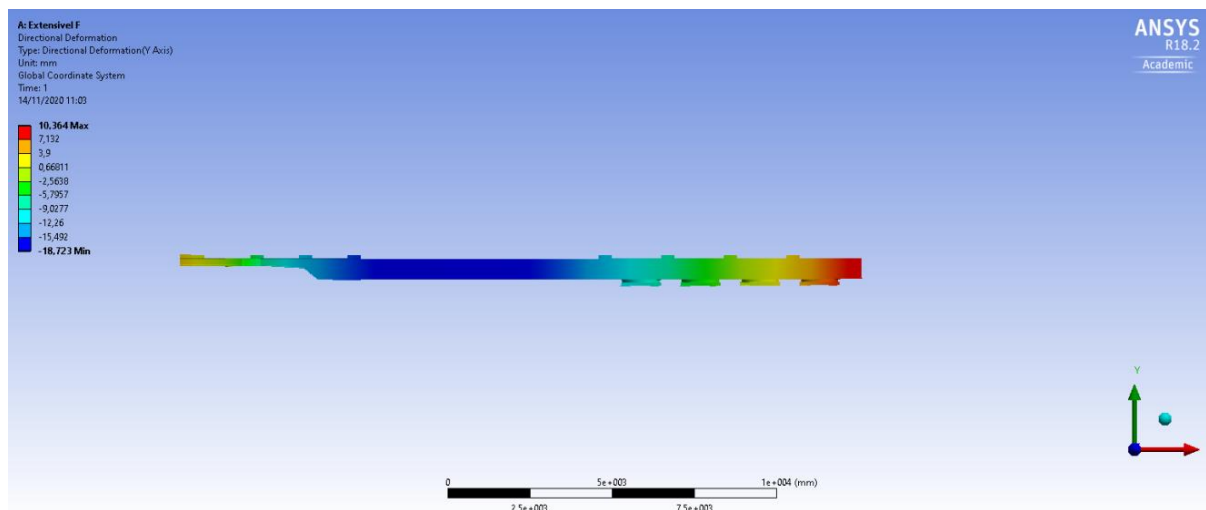


Figura 4-9 Ansys deformação em y de modelo de controlo

Com os resultados obtidos é possível definir de forma mais precisa qual o caminho a seguir com vista a elaborar um produto distinto e que se traduza numa clara amostragem de capacidade de engenharia e de criação de produto.

É importante ter presente que cada produto tem uma vertente ambiental forte, que está presente ao longo de todo o ciclo de vida do produto.

As fases de vida do produto estão ilustradas na fig. 4-10

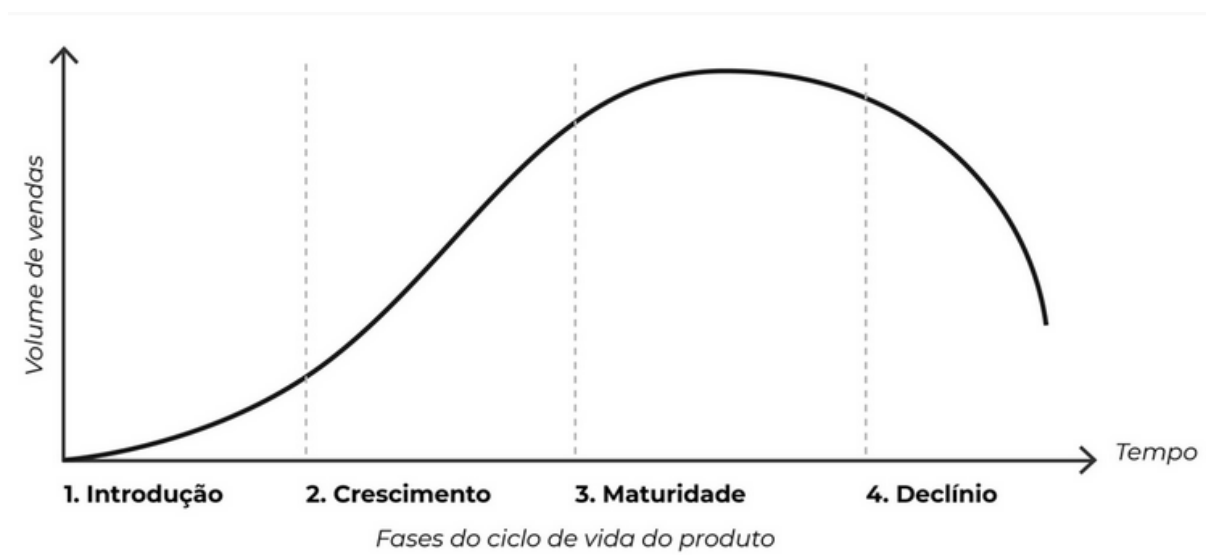


Figura 4-10 Ciclo de vida do produto

4.3 Efeito ambiental

Já lá vão os tempos em que o factor de emissões de CO_2 não era um ponto crítico para a nossa sociedade. A Europa não podia ficar indiferente a dados como os apresentados na fig. 4-11, estes dados não deixam dúvidas relativamente ao problema que esta geração tem de atacar de forma feroz.

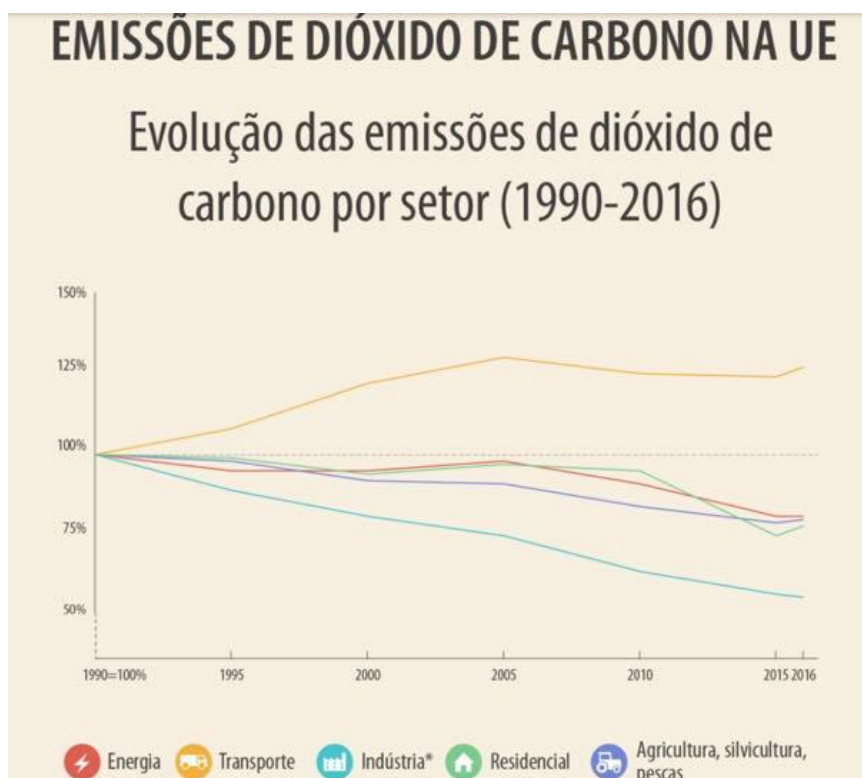


Figura 4-11 Evolução de emissões de carbono na UE, Parlamento Europeu

Conforme fig. 4-12 este problema não se resolve limitando apenas as emissões de dióxido de carbono dos veículos ligeiros.

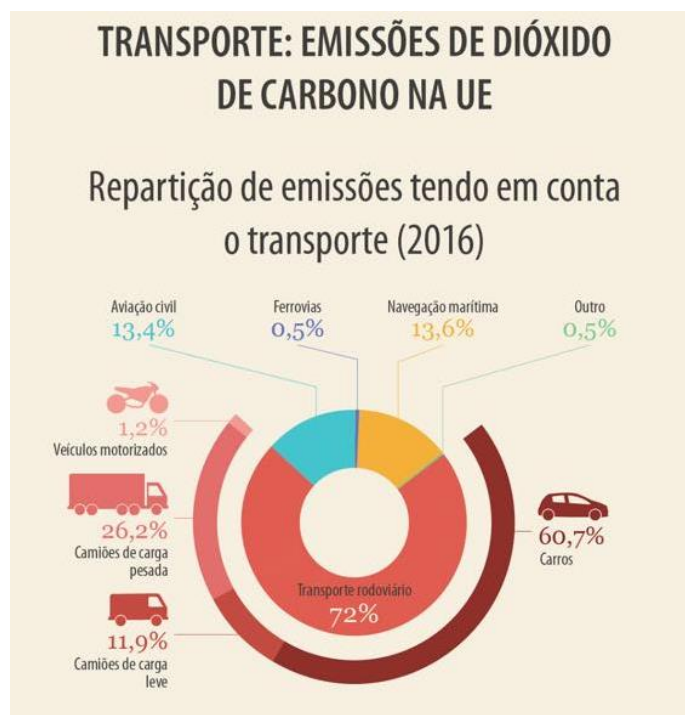


Figura 4-12 Repartição das emissões de dióxido de carbono, Parlamento Europeu

Pela primeira vez, a 14 de Agosto de 2019 foi adoptado um compromisso de redução de emissões de CO_2 nos veículos pesados, o regulamento (EU) 2019/1242 do Parlamento Europeu e do Conselho.

De acordo com o Parlamento Europeu:

"A partir de 2025, os novos camiões e autocarros emitirão em média menos de 15% de CO_2 , a partir de 2030, emitirão menos de 30% de CO_2 . Esta medida faz parte dos nossos esforços para descarbonizar o sector dos transportes rodoviários e é um passo importante para alcançar os objectivos que acordámos no âmbito do acordo de Paris. As normas hoje aprovadas significam que entre 2020 e 2030 emitiremos menos 54 milhões de toneladas de CO_2 , o que corresponde ao total anual das emissões de CO_2 da Suécia.

Se, numa primeira fase estas metas só se aplicavam a camiões com um peso bruto igual ou superior a 16t, fabricados a partir de 2019 em diante, o âmbito de acção será alargado. A partir de Janeiro de 2020 os veículos de distribuição com um peso bruto igual ou superior a 7,5t passarão a estar incluídos no objectivo.

O grupo de veículos pesados de mercadorias representa até 70% das emissões de CO_2 dos veículos pesados.

O regulamento será revisto até ao final de 2022, e, muito provavelmente alargado aos reboques, autocarros e veículos de mercadorias de peso bruto inferior a 7,5t.

Assim, faz sentido que este projecto origine um produto eficiente.

Segundo o Parlamento Europeu:

"Tal abordagem faseada (também) envia um sinal claro e atempado à indústria para que acelere a introdução no mercado de tecnologias energéticas e de veículos pesados com nível nulo ou baixo de emissões".

As estimativas apontam para que 25% das emissões de CO_2 da EU provenientes dos transportes sejam geradas por veículos pesados, a Comissão Europeia afirma que "sem a adopção de novas medidas, a proporção das emissões de CO_2 dos veículos pesados deverá aumentar cerca de 9% entre 2010 e 2030".

Assim, de forma a que a EU alcance até 2050 a redução de 60% em relação aos níveis de 1990 é fundamental que os veículos pesados deem o seu contributo.

De forma a que o semirreboque deste estudo contribua para o objectivo é importante que não esteja sobredimensionado e que tenha pouca resistência ao rolamento dos pneus. Estes dois pontos contribuem significativamente para um menor consumo de combustível do tractor e assim menores emissões de CO_2 .

5. Optimização

Após a primeira análise dita de "controlo", com 10 mm de valor de contra-flecha e secção de acordo com a fig. 5-1.

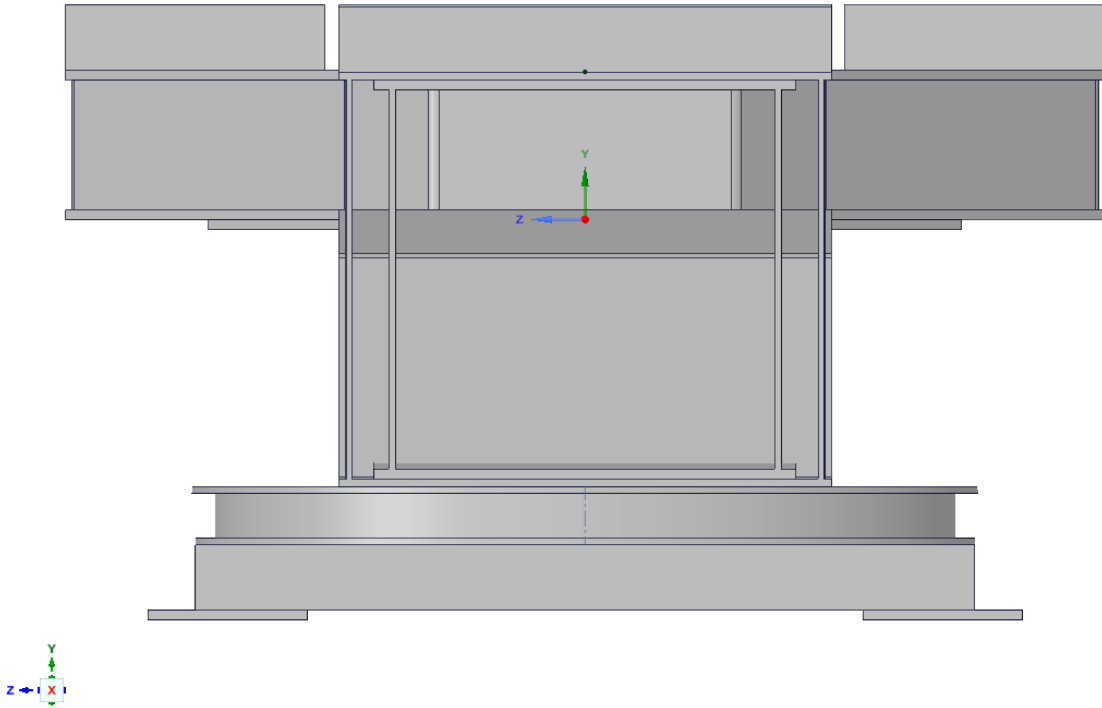


Figura 5-1 Ansys secção em vista de corte

E, uma vez que o modelo se encontra em domínio elástico, pretende-se estudar a influência da contra-flecha e do aumento de inércia da secção, com o intuito de se encontrar um valor óptimo para estes dois parâmetros.

A variação destes parâmetros está limitada pelas condições fronteira definidas.

A primeira condição fronteira diz respeito a limitações de natureza de fabrico e de método de extensão. O valor de contra-flecha não pode ser superior a 22 mm. Este valor é o máximo valor para o qual a viga na sua posição recolhida pode ser deslocada e acomodada dentro da viga do subconjunto III.

A segunda condição fronteira diz respeito ao valor máximo de deformação após carregamento. Isto é, a viga após carregamento não pode ter o sentido da sua

concavidade alterada em relação ao valor inicial. Desta forma a diferença entre o valor de contra-flecha inicial e o valor de deformada em y após carregamento tem de ser superior a 0 mm.

Esta condição tem como base a passagem de obstáculos, com a alteração da concavidade o semirreboque pode ser incapaz de passar obstáculos no seu estado estendido, já que a distância da superfície mais inferior do subconjunto I ao pavimento será maior que a do subconjunto II. Esta diferença torna-se tanto mais critica quanto maior for o vão estendido.

Analisando a deformada da viga flectida que está ilustrada na fig. 5-2 sabe-se que,

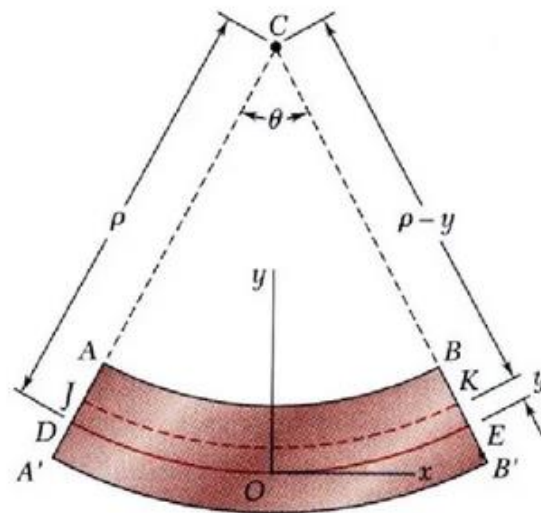


Figura 5-2 Flexão de vigas por "Mechanics of Materials"

Considerando válidas as hipóteses de Bernoulli, a relação entre a curvatura da linha da superfície neutra ($1/\rho$), momento flector (M), momento de inércia da secção (I) e o módulo de Young (E), é dado por:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI} \quad (5.1)$$

Para

$$\rho = R \quad (5.2)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{d^2y}{dx^2} \quad (5.3)$$

Igualando as equações (5.1) e (5.3), obtém-se a equação da elástica:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M}{EI} \quad (5.4)$$

Fazendo duas integrações sucessivas, obtém-se a deformada da viga.

$$y(x) = \frac{1}{EI} \int dx \int M(x) dx + C_1x + C_2 \quad (5.5)$$

Pela equação da deformada e, lembrando que se pretende estudar o caso de extensão máxima do semirreboque para as condições de carregamento já definidas, o parâmetro a alterar será o momento de inércia da secção. Pela equação verifica-se que o momento de inércia é inversamente proporcional à deformada da viga.

O momento de inércia da secção da viga é dado pelo somatório dos momentos de inércia dos 4 elementos que constituem a secção, alma esquerda (I) e alma direita (II) e, banzo superior (III) e banzo inferior (IV). A fig. 5-3 ilustra os 4 elementos da secção.

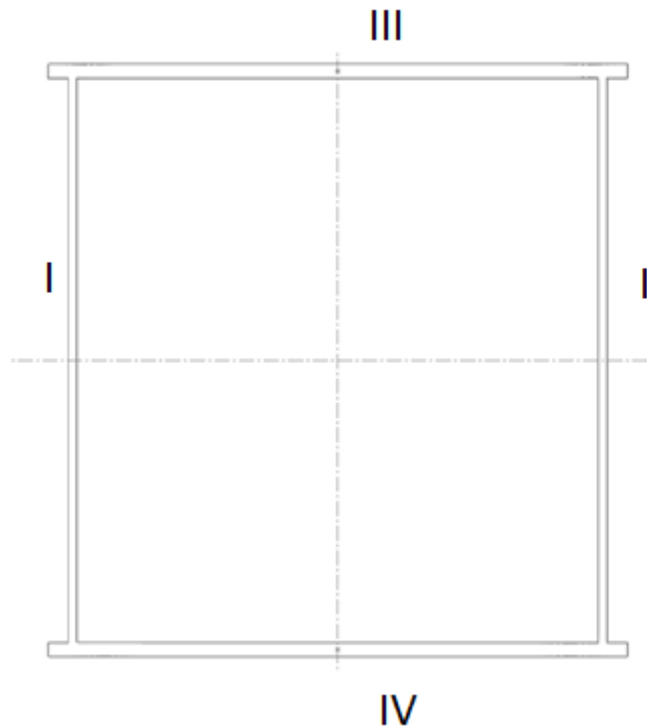


Figura 5-3 Secção e seus elementos

O momento de inércia da secção é dado pela soma dos momentos de inércia dos 4 elementos.

Não se faz a distinção entre banzo superior e banzo inferior pois têm as mesmas dimensões e estão equidistantes do centro. O mesmo acontece com as almas esquerda e direita.

Assim:

$$I = I_{banzo} \times n_{banzos} + I_{alma} \times n_{almas} \quad (5.6)$$

$$I = \left[\frac{1}{12} b_{banzo} h_{banzo}^3 + b_{banzo} h_{banzo} d_{c-banzo}^2 \right] \times 2 + \left[\frac{1}{12} b_{alma} h_{alma}^3 \right] \times 2 \quad (5.7)$$

Faz-se variar unicamente a espessura dos banzos pois é a variação possível que maior influência tem na alteração do valor do momento de inércia. Sabendo que a largura das vigas não é alterável pois elas já estão projectadas na largura máxima possível para os componentes a utilizar.

Utiliza-se o caso de largura máxima de vigas de modo a aumentar a estabilidade e resistência à torção do semirreboque. Os componentes de compra escolhidos, que fazem parte do subconjunto III, estão de acordo com este princípio de largura máxima.

A altura não é considerada como parâmetro a variar pois é uma alteração que teria de ser repercutida pelos restantes subconjuntos, caso contrário o semirreboque deixaria de estar à mesma altura, deixando assim de ser um estrado plataforma para ser um estrado rebaixado.

Um estrado rebaixado permite o transporte de elementos de maior altura, mas de menor comprimento. Apesar de não ser um caso de estudo para este trabalho, os resultados aqui obtidos podem facilmente ser utilizados nesse caso.

Pelo que este trabalho torna-se um muito bom ponto de partida para o caso de estrados extensíveis rebaixados.

5.1 Casos de ensaio

Tendo como base o modelo de controlo pretende-se estudar a influência dos parâmetros, espessura dos banzos da viga do subconjunto II (x_1) e valor de contra-flecha (x_2).

Os casos de estudo a realizar são exemplificados na tabela 4:

Tabela 4 Alteração de parâmetros

Ensaio	(x_1)[mm]	(x_2)[mm]
A	15	12
B	20	12
C	25	12
D	15	18
E	20	18
F	25	18
G	15	24
H	20	24
I	25	24

Para variar um elemento é necessário que essa alteração seja realizada em Solidworks, não sendo possível realizar essa alteração de forma directa no Ansys. Isto é, cada alteração origina um novo modelo para ensaio, o que se traduz numa alteração em Solidworks e respectivo processo de importação em Ansys.

Utiliza-se este método pois os parâmetros escolhidos têm influência nos elementos adjacentes, isto é, ao alterar a espessura dos banzos e mantendo fixa a altura total da viga é necessário reduzir a altura das almas. Da mesma forma ao alterar o valor de contra-flecha é necessário modificar tanto as almas como os banzos.

Para facilitar e, uma vez que este projecto é novo e ainda está na fase de desenvolvimento para ensaio, foi utilizado o método de modelação *top down*. A principal vantagem deste método em relação ao método *bottom up* é a criação de variáveis

externas à peça que são criadas no *assembly*. A alteração do valor dessa variável externa, no *assembly*, permite que regenerando o modelo a alteração seja feita de forma automática nas peças onde está referenciada. Para que tal aconteça a variável tem de ser incluída nas dimensões onde a alteração sofrerá efeito.

Numa fase de alteração de projecto para produção, quando o modelo final já estiver definido dever-se-ão remover as ligações às variáveis, de modo a que o modelo possa partilhar componentes com outros elementos da mesma família de máquina. Removendo assim o risco de alteração inadvertida de uma variável que terá efeito em peças já em produção.

O principal motivo para que a modelação seja feita no Solidworks, para além da clara superioridade do programa em termos de modelação CAD é que permite a inclusão de variáveis, algo que não poderia ser realizado no Ansys. Assim, teriam sempre de ser criados vários modelos, qualquer que fosse o sistema escolhido para criar o modelo.

Cada linha da tabela 4 representa um modelo diferente e, respectivamente, um ensaio diferente. Os parâmetros de carregamentos, restrições e propriedades de malha são comuns aos diversos modelos.

Uma vez que se utilizam modelos e ensaios diferentes não é possível utilizar a ferramenta de criação de superfícies de resposta do Ansys, pelo que será necessário recorrer a outro programa para a gerar, neste caso será utilizado o Matlab.

Os vários casos de estudo estão representados na fig. 5-4.

▼	A						
1	Static Structural						
2	Engineering Data	✓	▶				
3	Geometry	✓	▶				
4	Model	✓	▶				
5	Setup	✓	▶				
6	Solution	✓	▶				
7	Results	✓	▶				
	T000H-12-15						

▼	B						
1	Static Structural						
2	Engineering Data	✓	▶				
3	Geometry	✓	▶				
4	Model	✓	▶				
5	Setup	✓	▶				
6	Solution	✓	▶				
7	Results	✓	▶				
	T000H-12-20						

▼	C						
1	Static Structural						
2	Engineering Data	✓	▶				
3	Geometry	✓	▶				
4	Model	✓	▶				
5	Setup	✓	▶				
6	Solution	✓	▶				
7	Results	✓	▶				
	T000I-12-25						

▼	D						
1	Static Structural						
2	Engineering Data	✓	▶				
3	Geometry	✓	▶				
4	Model	✓	▶				
5	Setup	✓	▶				
6	Solution	✓	▶				
7	Results	✓	▶				
	T000H-18-15						

▼	E						
1	Static Structural						
2	Engineering Data	✓	▶				
3	Geometry	✓	▶				
4	Model	✓	▶				
5	Setup	✓	▶				
6	Solution	✓	▶				
7	Results	✓	▶				
	T000H-18-20						

▼	F						
1	Static Structural						
2	Engineering Data	✓	▶				
3	Geometry	✓	▶				
4	Model	✓	▶				
5	Setup	✓	▶				
6	Solution	✓	▶				
7	Results	✓	▶				
	T000I-18-25						

▼	G						
1	Static Structural						
2	Engineering Data	✓	▶				
3	Geometry	✓	▶				
4	Model	✓	▶				
5	Setup	✓	▶				
6	Solution	✓	▶				
7	Results	✓	▶				
	T000I-24-15						

▼	H						
1	Static Structural						
2	Engineering Data	✓	▶				
3	Geometry	✓	▶				
4	Model	✓	▶				
5	Setup	✓	▶				
6	Solution	✓	▶				
7	Results	✓	▶				
	T000I-24-20						

▼	I						
1	Static Structural						
2	Engineering Data	✓	▶				
3	Geometry	✓	▶				
4	Model	✓	▶				
5	Setup	✓	▶				
6	Solution	✓	▶				
7	Results	✓	▶				
	T000I-24-25						

Figura 5-4 Listagem de ensaios em Ansys

5.2 Resposta

Os resultados das diversas simulações são expressos na seguinte tabela 5:

Tabela 5 Listagem de ensaios e resultados

Ensaio	$(x_1)[mm]$	$(x_2)[mm]$	$\delta [mm]$	$\Delta\delta[mm]$
A	15	12	18,767	-6,767
B	20	12	17,322	-5,32
C	25	12	16,596	-4,596
D	15	18	18,815	-0,815
E	20	18	17,296	0,704
F	25	18	16,600	1,4
G	15	24	18,794	5,206
H	20	24	17,305	6,695
I	25	24	16,603	7,397

Após leitura dos resultados é possível retirar conclusões variando x_1 e mantendo fixo x_2 . O mesmo acontece se se variar x_2 e se mantiver fixo x_1 . De forma a encontrar valores para os casos não ensaiados, evitando realizar análises para os valores intermédios que se considerem fabricáveis bem como extrair relações para outras dimensões ou cargas a aplicar pretende-se utilizar a metodologia RSM.

A equação da função que representa a superfície de resposta é dada por:

$$y=f(x_1, x_2) \quad (5.8)$$

Pelo método dos mínimos quadrados o polinómio de primeira ordem é obtido através de:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon \quad (5.9)$$

Que pode ser escrito de forma matricial:

$$y = X\beta + \varepsilon \quad (5.10)$$

O valor β obtêm-se através de:

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T \Delta\delta \quad (5.11)$$

O polinómio para o caso em estudo fica:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \varepsilon \quad (5.12)$$

Matricialmente, tem-se a matriz X contendo os valores dos parâmetros x_i e o vector $\Delta\delta$ que representa os valores da variação da deformada em cada caso:

$$X = \begin{bmatrix} 1 & 15 & 12 \\ 1 & 20 & 12 \\ 1 & 25 & 12 \\ 1 & 15 & 18 \\ 1 & 20 & 18 \\ 1 & 25 & 18 \\ 1 & 15 & 24 \\ 1 & 20 & 24 \\ 1 & 25 & 24 \end{bmatrix} \quad \Delta\delta = \begin{bmatrix} -6,767 \\ -5,32 \\ -4,596 \\ -0,815 \\ 0,704 \\ 1,4 \\ 5,206 \\ 6,695 \\ 7,397 \end{bmatrix}$$

Obtém-se:

$$\hat{\beta} = \begin{bmatrix} -21,94 \\ 0,22 \\ 1 \end{bmatrix}$$

O polinómio de aproximação do valor de variação de deformada é dado pela regressão linear:

$$\widehat{\Delta\delta} = -21.94 + 0,22x_1 + x_2 \quad (5.13)$$

Obtêm-se os valores representados na tabela 6.

Tabela 6 Listagem de valores para mínimos quadrados

Ensaio	$(x_1)[mm]$	$(x_2)[mm]$	$\Delta\delta[mm]$	$\widehat{\Delta\delta}$	$e = \Delta\delta - \widehat{\Delta\delta}$
A	15	12	-6,767	-6,64	-0,127
B	20	12	-5,32	-5,54	0,22
C	25	12	-4,596	-4,44	-0,156
D	15	18	-0,815	-0,64	-0,175
E	20	18	0,704	0,46	0,244
F	25	18	1,4	1,56	-0,16
G	15	24	5,206	5,36	-0,154
H	20	24	6,695	6,46	0,235
I	25	24	7,397	7,56	-0,163

Os valores obtidos podem ser representados graficamente para melhor interpretação dos dados.

Assim, pelo gráfico 1 que representa a relação entre o valor residual e a resultante de deformada estimada conclui-se que o polinómio de primeira ordem não é suficiente para calcular o valor óptimo, uma vez que os pontos estão díspares não sendo possível encontrar a tendência dos mesmos.

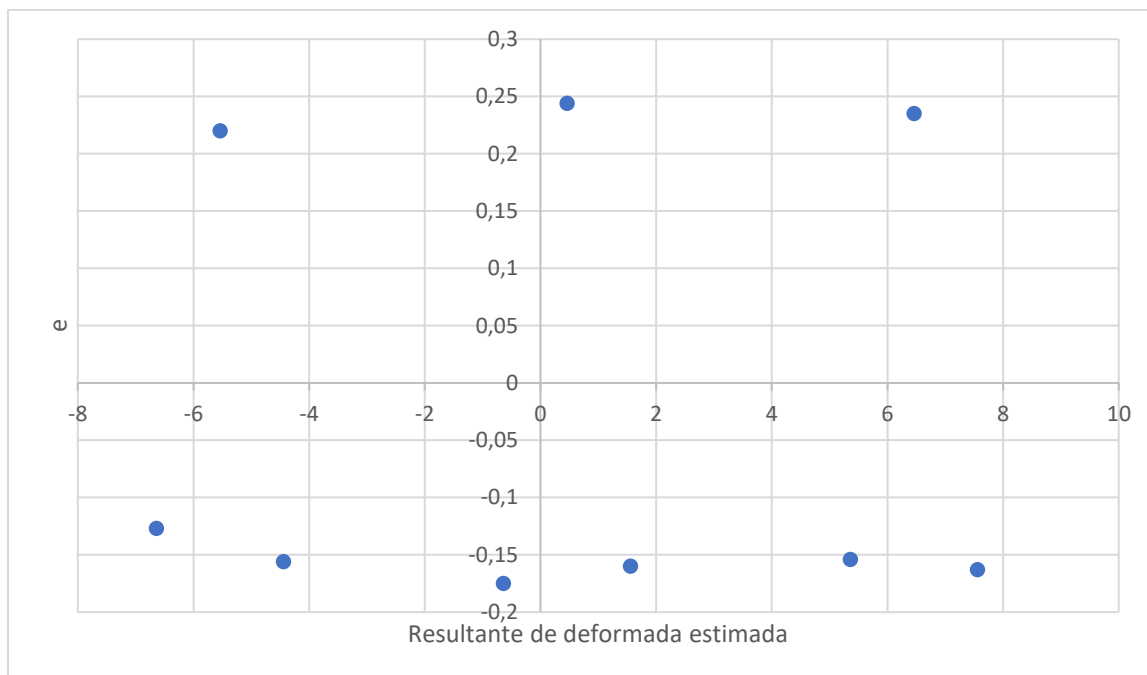


Gráfico 1 Residual vs Resultante de deformada estimada

Através do gráfico 2 que representa a relação entre o valor residual e a espessura dos banzos confirma-se que para espessuras de banzos iguais o valor de deformada não varia.

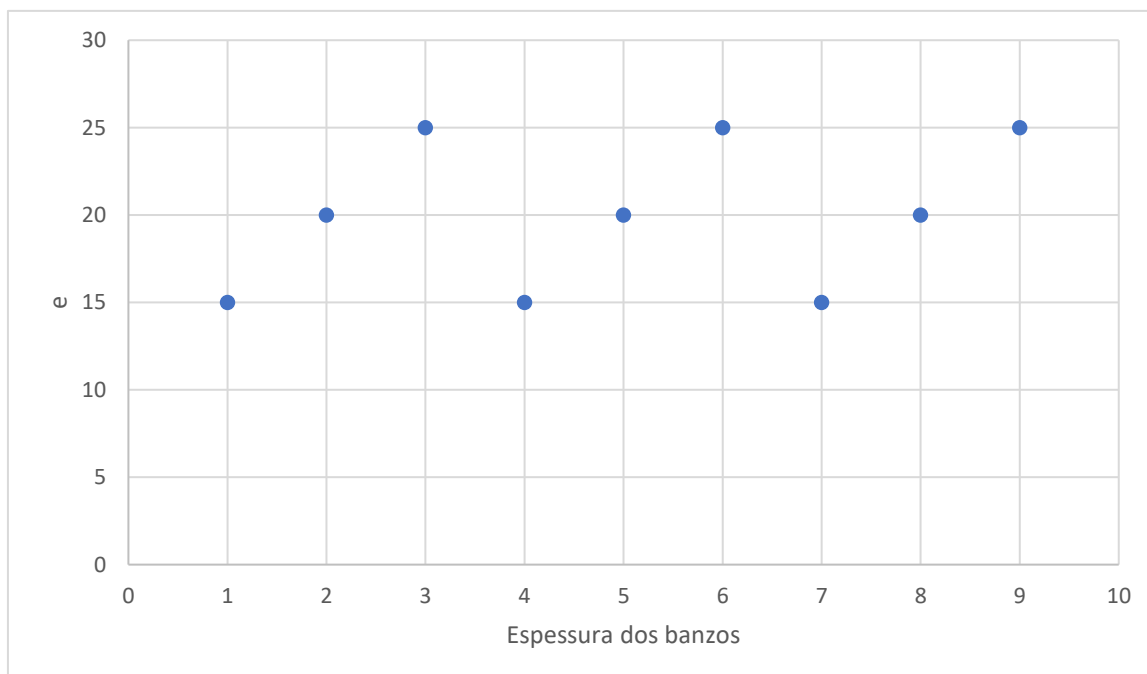


Gráfico 2 Residual vs Espessura dos banzos

Com o gráfico 3 conclui-se que para valores de contra-flecha muito próximos o valor residual varia bastante pelo que não é possível encontrar uma aproximação para os valores intermédios de contra-flecha.

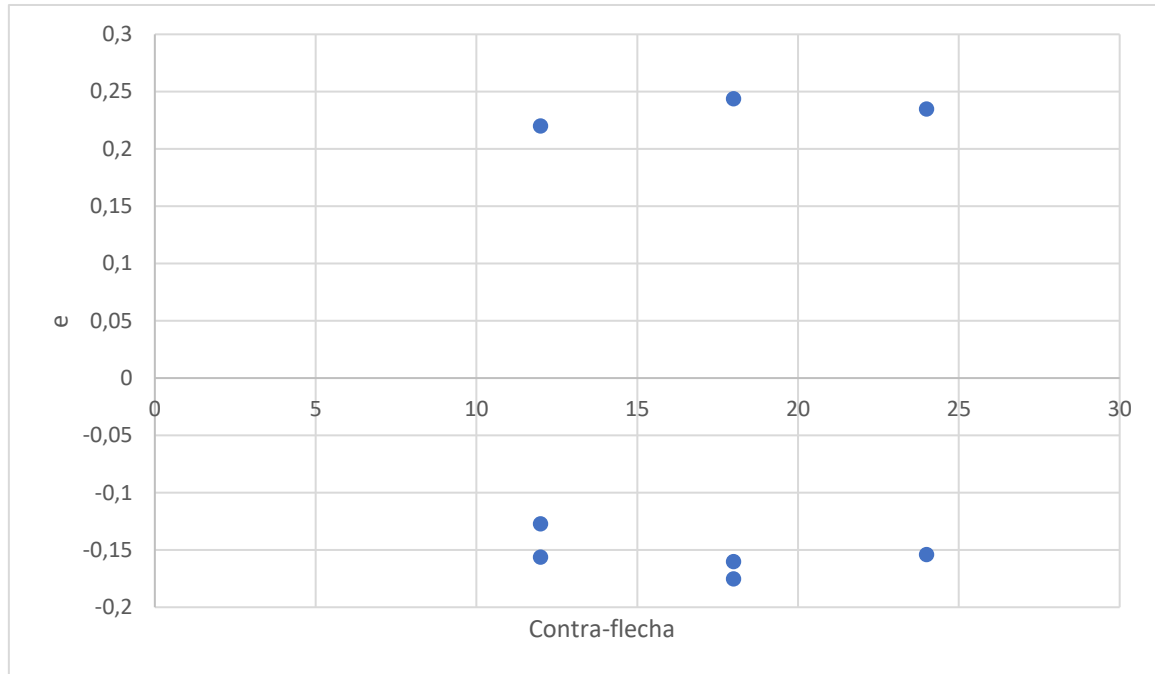


Gráfico 3 Residual vs Contra-flecha

Assim, é necessário recorrer a um polinómio de ordem superior

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (5.14)$$

A matriz que engloba os vectores das várias espessuras de banzo e de contra-flecha é dada por:

$$X = \begin{bmatrix} 15 & 12 \\ 20 & 12 \\ 25 & 12 \\ 15 & 18 \\ 20 & 18 \\ 25 & 18 \\ 15 & 24 \\ 20 & 24 \\ 25 & 24 \end{bmatrix}$$

O vector com os resultados de deformação obtidos no Ansys é dado por:

$$\Delta\delta = \begin{bmatrix} 18,767 \\ 17,322 \\ 16,596 \\ 18,815 \\ 17,296 \\ 16,600 \\ 18,794 \\ 17,305 \\ 16,603 \end{bmatrix}$$

Para resolver o problema utiliza-se o Matlab, o programa realizado pode ser consultado no anexo 7. A superfície de resposta obtida está ilustrada no gráfico 4.

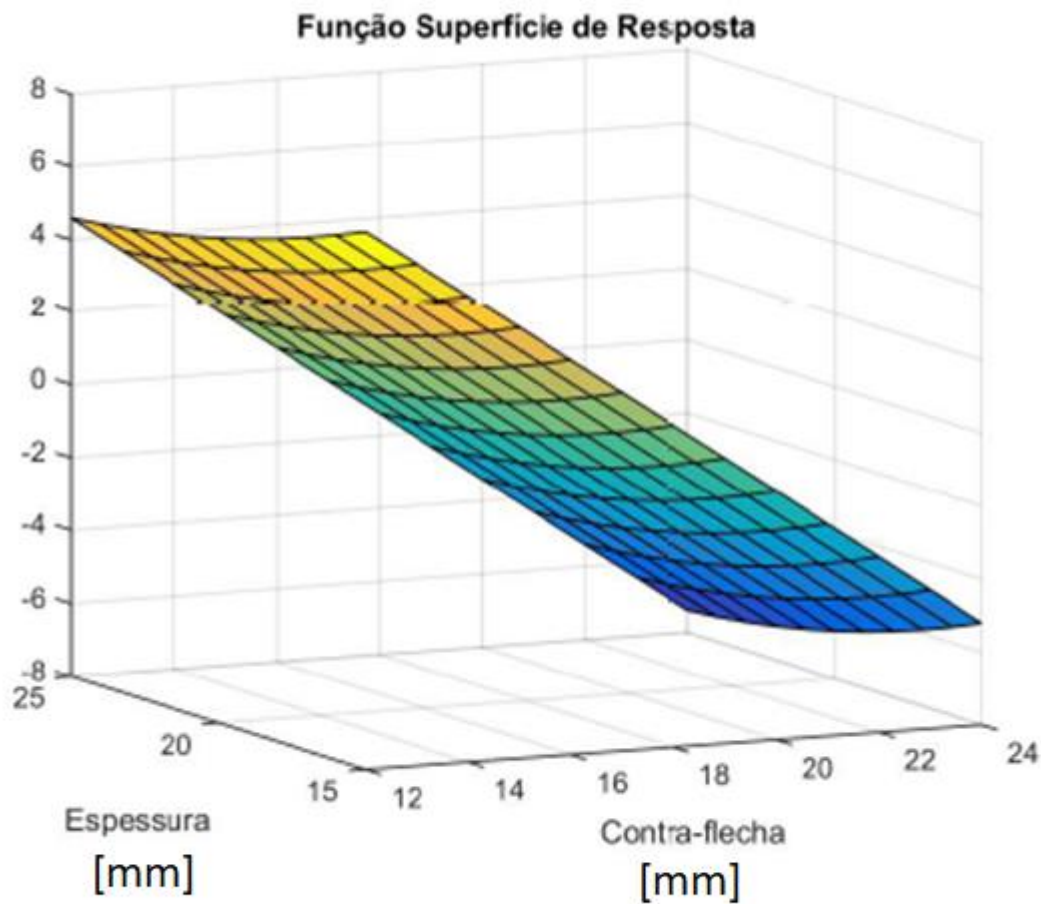


Gráfico 4 Função superfície de resposta

Pela superfície de resposta verifica-se que aumentando os valores de contra-flecha e de espessura, o valor de deformada aumenta em termos absolutos, mas com

valor negativo. Isto significa que a concavidade da contra-flecha mantém-se a mesma antes e depois do carregamento.

Incluindo as condições fronteira têm se ser tidas em conta, obtém-se a curva ilustrada no gráfico 5 onde se constata que se pode escolher qualquer valor fabricável, em função da espessura de chapa disponível no mercado, acima da curva.

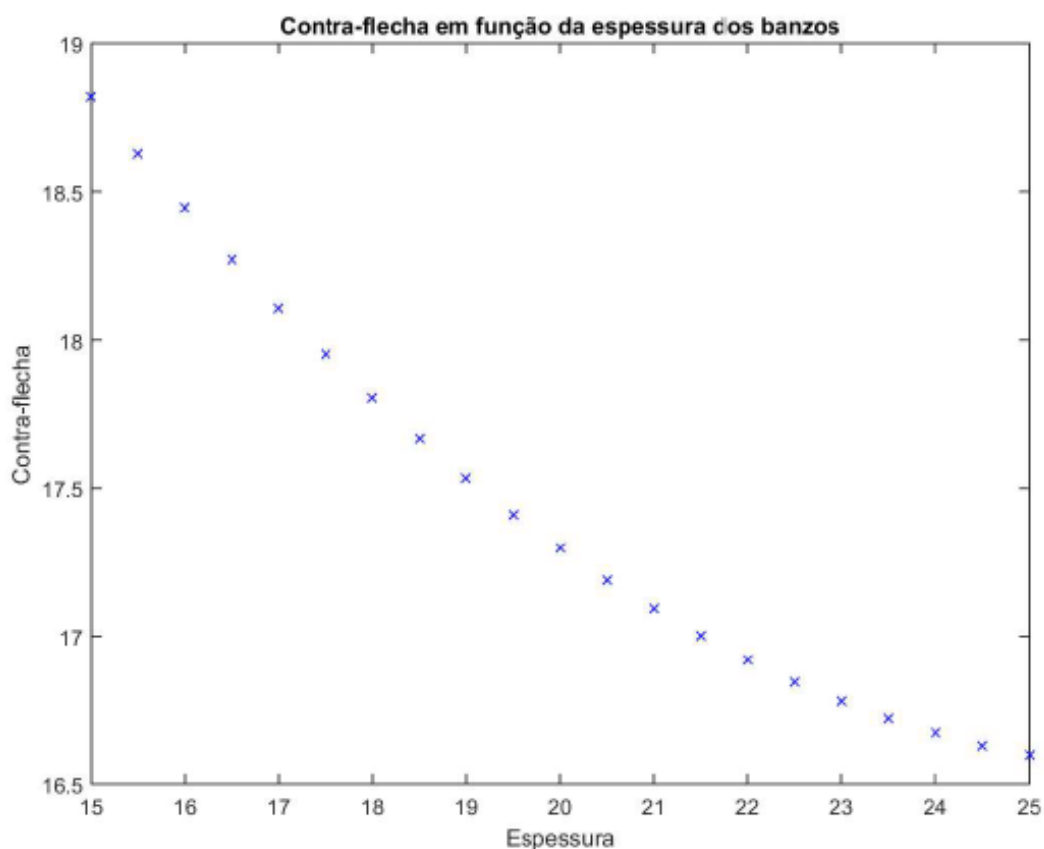


Gráfico 5 Representação da função de relação contra-flecha vs espessura

6. Conclusões

Definiu-se neste trabalho uma metodologia de projecto com recurso ao Solidworks, ao Ansys Workbench e ao método das superfícies de resposta e demonstrou-se a sua aplicação na definição de parâmetros - espessura dos banzos e valor da contra-flecha - no projecto de um semirreboque extensível.

De acordo com a superfície de resposta e, tendo em conta as limitações de espessura de chapas disponíveis no mercado, verifica-se que mantendo fixo o tipo de carregamento e tendo por base a redução de peso do semirreboque o valor óptimo corresponde à menor espessura e maior valor de contra-flecha. Isto é para uma espessura de 15 mm e uma contra-flecha de 18,5 mm. Considerando outros carregamentos aplicados poderão ser obtidas conclusões diferentes, pelo que o primeiro passo antes da realização de ensaios é definir para que aplicação e com que comprimento máximo o semirreboque deve ser projectado para trabalhar.

A metodologia de projecto de um semirreboque estrado extensível deverá ser composta pelas seguintes fases. Definição das condições de trabalho de um semirreboque e elaboração de um modelo simplificado de esforços aplicados, consulta da legislação em vigor, definição dos parâmetros optimizáveis, projecto do semirreboque de modo a ser ensaiado, ensaio e optimização e por fim elaboração de projecto com detalhes técnicos para produção.

A partilha desta metodologia é extremamente útil para o mercado nacional, é uma base sólida para que os fabricantes possam dar início a um desenvolvimento sustentável de uma gama de produtos capaz de rivalizar com os pares europeus. Permitindo uma aproximação tecnológica ao que de mais desenvolvido os restantes fabricantes europeus praticam.

Bibliografia

- 1.Jost. Catálogo de King-Pin. <https://www.jost-world-kataloge.de/en/jost-truck-trailer/king-pins.html> (Consult. Set, 2020)
- 2.Jost. Catálogo de boleias giratórias. <https://www.jost-world-kataloge.de/en/jost-truck-trailer/ball-bearing-turntablesand-slewing-rings.html> (Consult. Set, 2020)
- 3.Continental. Commercial Vehicle Technical Data Book 2015. <http://blobs.continental-tires.com/www8/servlet/blob/370368/c280473c915d45734f20c7ec1f4c3ac0/technical-data-book-en-data.pdf> (Consul. Set, 2020)
- 4.BPW. Catálogo de suspensões pneumáticas. <https://www.bpw.de/en/products/axle-running-gears/air-suspension> (Consult. Set, 2020)
- 5.Gigant. Catálogo de suspensões pneumáticas. <https://www.gigant.com/en/products/suspension/air-suspension/> (Consult. Set, 2020)
- 6.Tridec. Catálogo de sistemas direccionais. <https://www.tridec.com/en/products-steering-systems-and-axle-suspensions.html> (Consult. Set, 2020)
- 7.Galucho. Consulta de equipamentos. <https://galucho.pt/categoria/transportes/> (Consul. Set, 2020)
- 8.Invepe. Consulta de equipamentos. <https://www.invepe.pt/pt/produtos/extensivos> (Consult. Set, 2020)
- 9.Faymonville. Consulta de equipamentos. <https://www.faymonville.com/products/flatbed-trailer/> (Consult. Set, 2020)
- 10.Nooteboom. Consulta de equipamentos. <https://www.nooteboom.com/cat/megatrailers/> (Consult. Set, 2020)
- 11.Goldhofer. Consulta de equipamentos. <https://www.goldhofer.com/en/semitrailers/flatbed-spz-l-gl> (Consult. Set, 2020)
- 12.Rojo Trailer. Consulta de equipamentos. <https://www.rojotrailer.com/producto/pe-line/> (Consult. Set, 2020)

- 13.LASO. Consulta de cargas comuns. <http://www.laso.pt/index.php?page=48&lang=pt> (Consult. Out, 2020)
- 14.Solidworks. Consulta de ajuda. <https://help.solidworks.com/> (Consult. Out, 2020)
- 15.Ansys. Parametric Design Language Guide. Disponível em https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/fea/ansys/ans_apdl.pdf (Consult. Out, 2020)
- 16.Ansys. Workbench Verification Manual. Disponível em <http://docshare01.docshare.tips/files/22829/228290690.pdf> (Consult. Out, 2020)
- 17.Ansys. Known Issues and Limitations. Disponível em http://storage.ansys.com/doc_assets/kil_docs/Known_Issues_and_Limitations_192.pdf (Consult. Out, 2020)
- 18.Ansys. DesignModeler User Guide. Disponível em <http://www.kkiem.mech.pg.gda.pl/oacm/kosmos/workbench/instrukcja.pdf> (Consult. Out, 2020)
- 19.Ansys. Consulta de ajuda. <https://www.ansys.com/blog> (Consul. Out, 2020)
- 20.International Organization for Standardization. (2000). Road Vehicles - Mechanical coupling between tractor and semi-trailers - Interchangeability. ISO 1726:2000 (Consult. Out, 2020)
- 21.Jornal Oficial das Comunidades Europeias. Directiva 96/53/CE do Conselho de 25 de Julho de 1996 (Consult. Out, 2020)
- 22.DAF. Consulta de tractores. <http://www.gsvi.pt/veiculos/configurador-camioes-daf> (Consult. Fev, 2020)
- 21.Ferdinand P. Beer, E. Russell Johnston, JR.. Mechanics of Materials. McGraw Hill, 1992 (Consult. Maio, 2020)
- 22.Kaiwu Cai, Wei Cheng, Jifu Lu. Finite element analysis on the bending condition of truck frame before and after opening. <https://doi.org/10.1063/1.5039032>. (Consult. Mar, 2020)
- 23.Mohd Azizi Muhammad Nor, helmi Rashid, Wan Mohd Faizul Wan Mahyuddin, Mohd Azuan Mohd Azlan, Jamaluddin Mahmud. Stress Analysis of a

Low Loader Chassis. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705812026744>. (Consult. Mar, 2020)

24. Ahmad O. Moaaz, Nouby M. Ghazaly. Finite Element Stress Analysis of Truck Chassis Using Ansys: Review. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.683.8087&rep=rep1&type=pdf> (Consult. Mar, 2020)

25. Ashif Iquball, S. M. Oak, R. S.Kharatmal. Analytical Optimization of Chassis Frame for 40ft Dual-Axle Flatbed Trailer Design. https://www.researchgate.net/publication/271257177_Analytical_Optimization_of_Chassis_Frame_for_40ft_Dual-Axle_Flatbed_Trailer_Design (Consult. Abr, 2020)

26. Hemant B. Patil, Sharad D. Kachave, Eknath R. Deore. Stress Analysus of Automotive Chassis with Various Thicknesses. <https://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/vol6-issue1/G0614449.pdf?id=2416> (Consult. Abr, 2020)

27. Singiresu S. Rao. The Finite Element Method In Engineering. Elsevier, 2005. (Consult. Jun. 2020)

28. Munish Kumar. FEM Analysis of a Flatbed Semi-Trailer Chassis Structure. http://ijrar.com/upload_issue/ijrar_issue_1097.pdf (Consult. Abr, 2020)

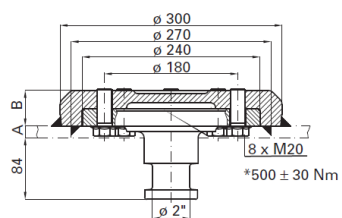
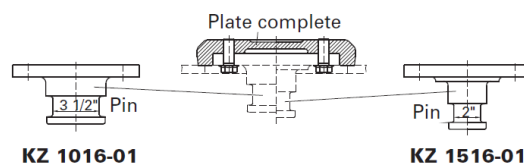
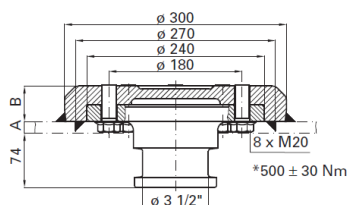
29. Grzegorz Koszalka, Hubert Debski, Marek Dziurka, Maciej Kaczor. Design of a Frame to a Semi low-Loader. <https://pdfs.semanticscholar.org/e4a6/185ea6b53d07afa7a02957d18d33c90303de.pdf> (Consult. Abr, 2020)

30. Luis Veiga da Cunha, Desenho Técnico. Fundação Calouste Gulbenkian (Consult. Out, 2020)

31. Matlab. Consulta de ajuda. <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/help.html>. (Consult. Nov, 2020)

32. Emissões de Dióxido de Carbono na UE . <https://www.europarl.europa.eu/news/pt/headlines/society/20190313STO31218/emissoes-de-dioxido-de-carbono-nos-carros-factos-e-numeros-infografia> (Consult. Jan, 2021)

Anexo A

KZ 1016, 1516

Selection table / Versions available

Order No. King pins, complete	D value (kN)	A (mm)	B (mm)	Approval (EC/ECE)
KZ 1516	170.0	16	48	e1 00-0148
KZ 1016	320.0	16	48	E1 55R-01 0150

Delivery includes

- Pin / plate, complete

Mounting = 8 x screw KZE 1016-06 (please order separately).

* Starting torque

Figura 0-1 Anexo A King-pin JOST

Anexo B

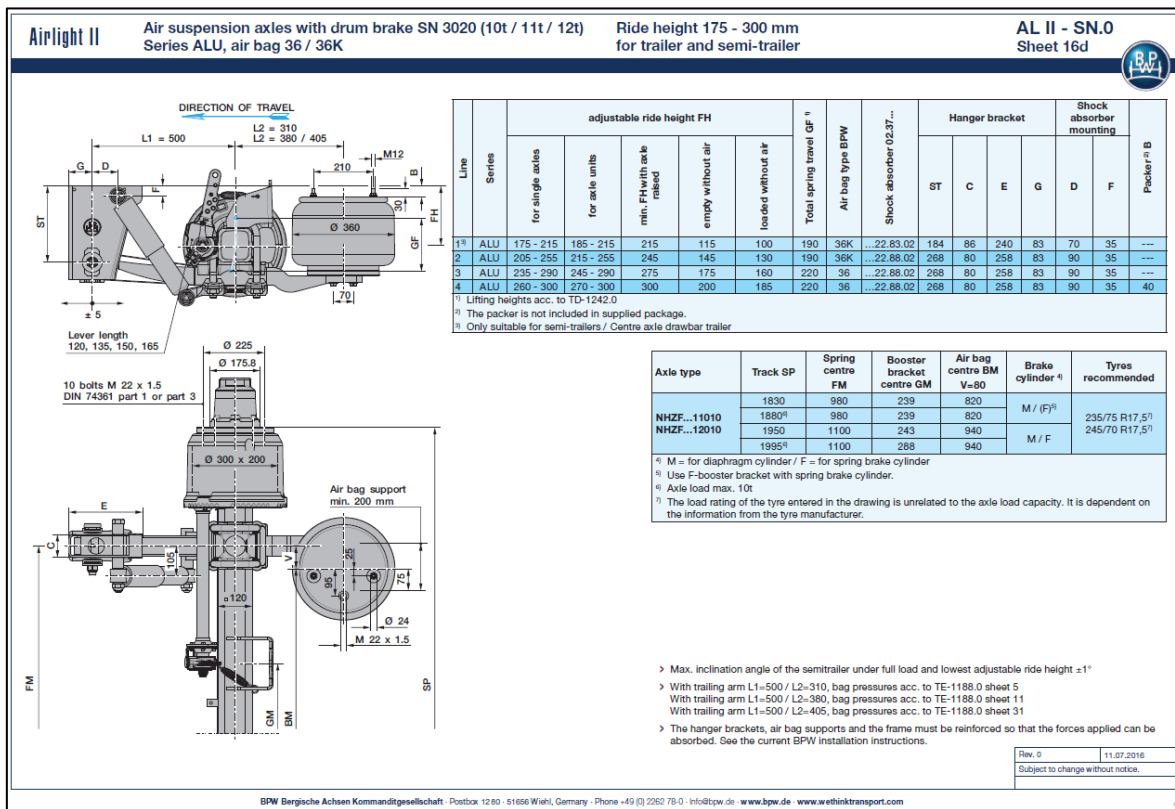
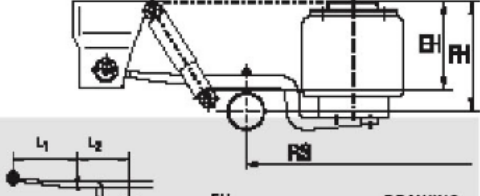


Figura 0-2 Anexo B eixo BPW

Anexo C

NLR
RIDE HEIGHT: appr. 300 - 450 mm
BELLOW: Ø 360 mm
LIFT IN TOTAL: 200 mm
SPRING WIDTH: 100 mm



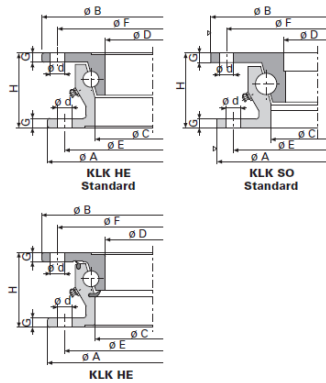
MODEL	FH ride height	RS wheel base min.	PERM. AXLE LOAD (kg)	ORDER NO.	DESCRIPTION	L1	L2	t	EH inst. height	LOWERING	DRAWING NO.
NLRO	390 - 450	1195	12000	700683508	NLRO 50/12.1	500	380	1x 56	352 ±30	ca. 100	71.010-4
				700683509	NLRO 50/12			2x 43			
NLRM	370 - 430	1195	12000	700683528	NLRM 50/12.1	500	380	1x 56	312 +40/-10	ca. 70	71.011-4
				700683529	NLRM 50/12			2x 43		ca. 75	
NLRS	320 - 380	1195	12000	700683568	NLRS 50/12.1	500	380	1x 56	257 +40/-10	ca. 75	71.012-4
				700683569	NLRS 50/12			2x 43		ca. 80	
NLRT	300 - 360	1195	12000	700683548	NLRT 50/12.1	500	380	1x 56	229 +50/-0	ca. 60	71.013-4
				700683549	NLRT 50/12			2x 43		ca. 65	

Figura 0-3 Anexo C eixo Gigant

Anexo D

Ball bearing turntables KLK HE and SO

Technical Specification



KLK HE Standard

KLK SO Standard

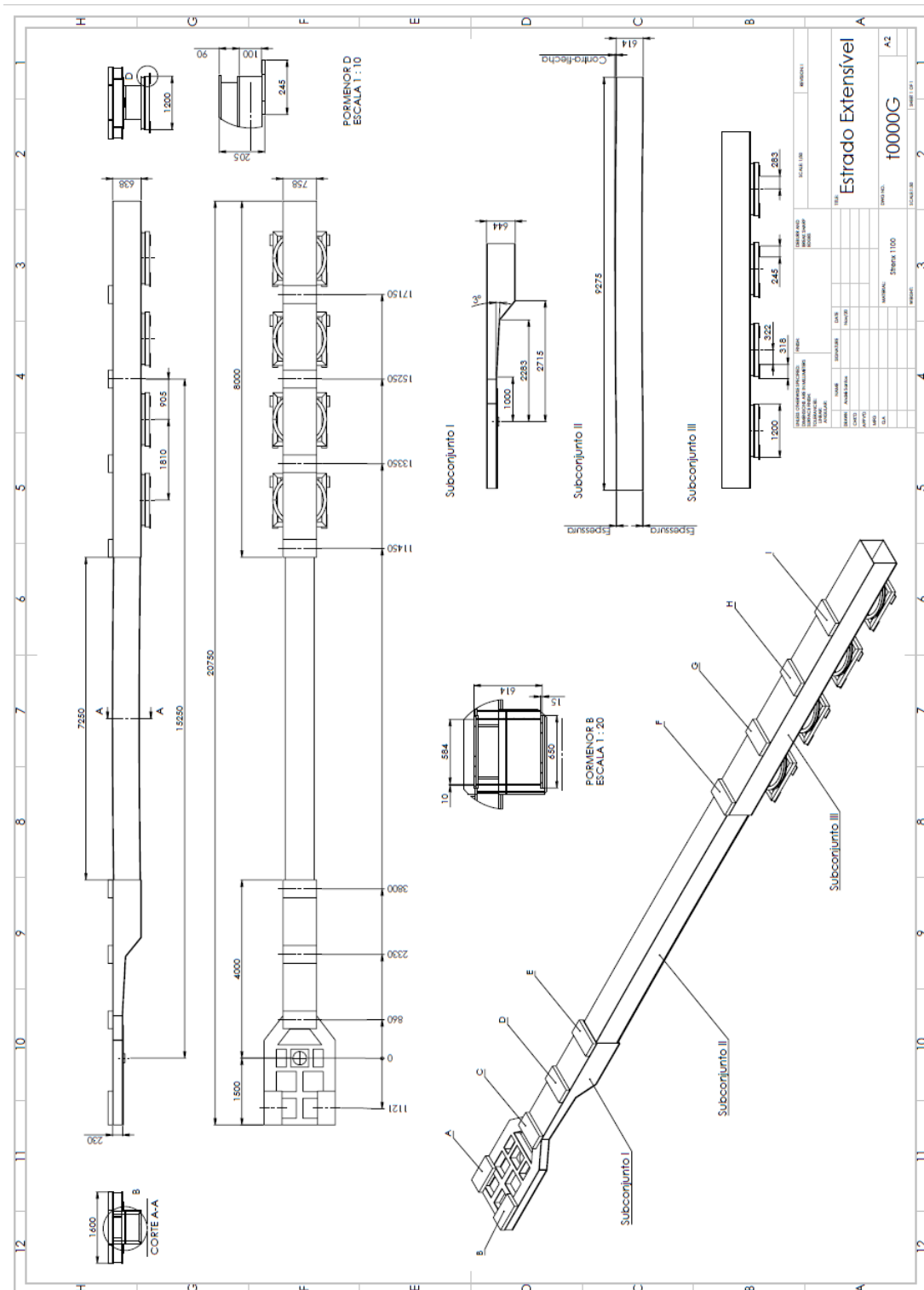
KLK HE
Low-maintenance

Selection table / Versions available

Order No.	Permitted axial load (kN)	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	E (mm)	F (mm)	d (mm)	G (mm)	H (mm)	Weight (appr. kg)	WA	Drill template No.
KLK HE 4	30	685	700	590	573	657	671	9	80	32.0	Standard	Undrilled	
(...)													
KLK HE 1200-22	130	1200	1211	1086	1059	1160	1174	18	10	90	76.0	Standard	1
KLK HE 1200-22 W	130	1200	1211	1082	1050	1160	1174	18	10	90	80.0	Low-mainte.	1

Figura 0-4 Anexo D boleia giratória Jost

Anexo E



Anexo F

```

i Quadratic Response Surface
i
i Data: T = x1 - Vector com as várias espessuras
i       CF = x2 - Vector com as várias contra-flechas
i       F = Vector com as flechas máximas obtidas
i
i O modelo de resposta em superfície é do tipo:
i
i  $F = A0 + A1 * T + A2 * CF + A3 * T * CF + A4 * T^2 + A5 * CF^2 +$ 
i  $A6 * T^2 * CF + A7 * T * CF^2 + A8 * T^2 * CF^2$ 
i
i
i clear;
i Matriz com os valores dos parâmetros T e CF (Tabela 4)
i Parametros: [15 12; ...
i              20 12; ...
i              25 12; ...
i              15 18; ...
i              20 18; ...
i              25 18; ...
i              15 24; ...
i              20 24; ...
i              25 24];
i
i Vector com os valores de delta obtidos no ANOVA (Tabela 5)
i delta: [18.767;...
i         17.322;...
i         16.596;...
i         18.815;...
i         17.296;...
i         16.680;...
i         18.794;...
i         17.385;...
i         16.683];
i
i Calcula a matriz B
i zeros(9);
i for i= 1:9
i     T= Parametros(i,1);
i     CF= Parametros(i,2);
i     B(i,1)= 1;
i     B(i,2)= T;
i     B(i,3)= CF;
i     B(i,4)= T*CF;
i     B(i,5)= T^2;
i     B(i,6)= CF^2;
i     B(i,7)= T^2*CF;
i     B(i,8)= T*CF^2;
i     B(i,9)= T^2*CF^2;
i end
i
i Calcula o vector C
i delta=Parametros(:,2);
i
i Calcula os 9 coeficientes A do polinómio quadrático
i resolvendo o sistema de eq. lineares [B](A)=([C]
i B\C;
i
i Desenha o gráfico da superfície de resposta
i =====
i zeros(11,1);
i zeros(13,1);
i zeros(11,13);
i for i=1:11 % 11 espessuras
i     for j=1:13 % 13 contra-flechas
i         T= i+15; % valor da espessura
i         CF= j+11; % valor da contra-flecha
i         X(i)= T;
i         Y(i)= CF;
i         Z(i,j)= A(1) + A(2)*T + A(3)*CF + A(4)*T*CF + A(5)*T^2 + ...
i             A(6)*CF^2 + A(7)*T^2*CF + A(8)*T*CF^2 + A(9)*T^2*CF^2;
i         % Descomentar para ver os valores de T e CF admissíveis
i         %if Z(i,j)<0
i             % Z(i,j)=0;
i         %end
i     end
i end
i
i surf(Y,X,Z);
i title('Função Superfície de Resposta');
i label('Espessura');
i label('Contra-flecha');
i
i
i Agora pode obter-se a curva que representa
i a função CF = f(T) assumindo a flecha Z = 0
i
i exp= zeros(21,1);
i contraf= zeros(21,1);
i cont= 1;
i for T=15:0.5:25 % 21 valores da espessura T
i     CF= vpasolve( A(1) + A(2)*T + A(3)*x + A(4)*T*x + A(5)*T^2 + ...
i         A(6)*x^2 + A(7)*T^2*x + A(8)*T*x^2 + A(9)*T^2*x^2, x );
i     if CF(1) > 12 && CF(1) < 24
i         contraf(cont)= CF(1);
i     else
i         contraf(cont)= CF(2);
i     end
i     exp(cont)= T;
i     cont= cont+1;
i end
i
i figure
i plot(exp,contraf,'x');
i title('Contra-flecha em função da espessura dos banzos');
i label('Espessura');
i label('Contra-flecha');
i

```